

# Béton d'Argile Environnemental

Résultats d'un programme de recherche tourné vers l'application









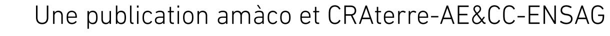












Une publication amàco et CRAterre-AE&CC-ENSAG

Projet financé par le Ministère de l'Écologie, du Développement durable, et de l'Energie dans le cadre du programme incitatif C2D2 (Concevoir et Construire pour le Développement Durable).
Convention de subvention n° 10 MGC S011.

AUTEURS
Mariette MOEVUS-DORVAUX
Lucile COUVREUR
Basile CLOQUET
Laetitia FONTAINE
Romain ANGER
Patrice DOAT

RESPONSABLES DE PROJET
Patrice DOAT, Laetitia FONTAINE, Romain ANGER

CONTRIBUTIONS
Yves JORAND, Sandrine MAXIMILIEN, Christian OLAGNON, MATEIS-INSA, Lyon
Lionel RONSOUX, MATEIS-INSA, Lyon et DGCB-ENTPE, Vaulx-en-Velin
Laurent ARNAUD, Claude LAMARQUE, DGCB-ENTPE, Vaulx-en-Velin
Martin POINTET, CARACOL, Grenoble
Marta MEDALA, Christèle SCHMID, Cédric FLAMENT, groupe CB, Ferques
Marie-Anne BRUNEAUX, Christian PAILLARD, Pascal MAILLARD, CTMNC, Clamart, Andreas KREWETT, Daniel TURQUIN, AKTERRE, Eymeux

1ère édition (papier et numérique) : mars 2016
2ème édition revue et corrigée (numérique) : jullet 2016
dépôt légal : juillet 2016
CRAterre éditions, Villefontaine
ISBN 978-2-906901-94-0

























# Béton d'Argile Environnemental 2010-2013

## Résultats d'un programme de recherche tourné vers l'application

# Préface



La direction de la recherche et de l'innovation du ministère chargé du développement durable a soutenu, de 2009 à 2014, un programme incitatif de recherche intitulé C2D2 – Concevoir et construire pour le développement durable. Ce programme visait à encourager les changements initiés par les acteurs de la construction en réponse aux enjeux de soutenabilité du secteur, qu'il s'agisse de mieux maîtriser l'impact environnemental de la construction, de l'entretien ou de l'exploitation des ouvrages, de réduire à toutes les étapes de leur vie leur consommation en matières premières ou de les adapter aux impacts du changement climatique.

Le présent ouvrage valorise les avancées scientifiques et techniques de l'un des projets de recherche appliquée de ce programme : BAE pour béton d'argile environnemental. Dévolu au matériau terre crue pour la construction, BAE est la concrétisation d'un partenariat efficace entre laboratoires publics et entreprises.

Il s'agit d'un projet exemplaire à plusieurs égards. Exemplaire d'abord dans son ambition de faire de la terre crue un béton presque comme les autres et de l'argile en particulier un ciment écologique d'avenir, à la fois moins consommateur de ressources non renouvelables et moins émetteur de gaz à effet de serre dans sa fabrication. Exemplaire ensuite dans son organisation, par la participation d'acteurs de la filière du béton traditionnel et par un premier transfert au matériau terre des techniques industrielles de confection des bétons et céramiques. Exemplaire aussi dans ses réalisations, à travers la conduite fructueuse de chantiers expérimentaux à échelle réelle et la fabrication pré-industrielle de composants prototypes pour la construction. Exemplaire enfin dans la capitalisation qui a été faite des savoirs et savoir-faire existants et dans la valorisation des résultats de ces nouvelles recherches tournées vers la pratique.

Si d'importants travaux de recherche et développement restent encore à mener pour faire de l'utilisation de bétons en terre crue une réalité tangible, les pages qui suivent apporteront au lecteur, averti ou non, des perspectives nouvelles sur les propriétés de ce matériau écologique et son potentiel de mise en œuvre dans la construction.

Les premiers pas tracés par les partenaires de cet ambitieux projet expérimental contribueront, nous l'espérons, à asseoir la crédibilité d'une filière terre crue (re)naissante.

Serge Bossini
Directeur de la recherche et de l'innovation
Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie

BETON D'ARGILE ENVIRONNEMENTAL

# TABLE DES MATIÈRES

BETON D'ARGILE ENVIRONNEMENTAL

# Introduction



La terre est un matériau à changement de phase naturel, localement disponible, à faible énergie grise et recyclable. Ces qualités en font un matériau de construction d'avenir. Pourtant à l'heure actuelle, son utilisation dans des constructions neuves reste marginale. Parmi les nombreux freins au développement d'une filière terre crue en France, des verrous techniques méritent d'être levés sur la base d'une meilleure compréhension scientifique de ce matériau pour diminuer le coût de main d'œuvre et réduire les durées de chantier.

La physique et la mécanique de la matière divisée (et ultra divisée) sont des domaines en plein essor. L'éclosion des nanosciences offre un nouvel éclairage sur les comportements mécaniques, thermiques, hygrométriques et rhéologiques du matériau terre, en particulier aux échelles physico-chimiques les plus fines des argiles.

À cet apport de connaissances théoriques s'ajoute un savoir-faire industriel très élaboré pour la mise en œuvre de matériaux offrant de nombreux points communs avec la terre, véritable béton d'argile. Ainsi, les méthodes appliquées à la confection de bétons de ciment toujours plus performants d'une part et celles appliquées au coulage des crus des céramiques industrielles d'autre part sont transférables au matériau terre.

D'autre part, le marché spécialisé de la construction en terre s'organise et se développe rapidement. À cela s'ajoute une demande sociétale toujours plus forte qui conduit par exemple les industriels de la brique cuite à proposer des briques crues. Les carrières de granulats souhaitent quant à elles valoriser leurs importants volumes de coproduits de carrières (fines argilo-calcaires).

Les conditions sont donc réunies pour mettre en place à l'échelle nationale, à l'instar de la filière bois, une filière terre qui s'appuie sur des bases scientifiques et techniques approfondies.

L'enjeu scientifique réside notamment dans une meilleure compréhension du matériau terre et des phénomènes physiques qui interviennent au cours de son cycle de vie. L'eau joue un rôle capital, encore mal maîtrisé, à chaque étape du cycle de vie, et notamment sur les qualités d'usage de la terre crue dans la construction : comportements mécanique, thermique, hygrométrique, etc.



Une meilleure connaissance des systèmes argile/eau permettrait d'envisager le coulage du matériau terre à l'état liquide tout en garantissant des propriétés d'usage intéressantes. Une meilleure compréhension de la cohésion du matériau permettrait d'imaginer des liants argileux plus performants notamment par ajout de polymères : les nanocomposites argile/polymère ouvrent la voie à de nouveaux matériaux de construction performants.

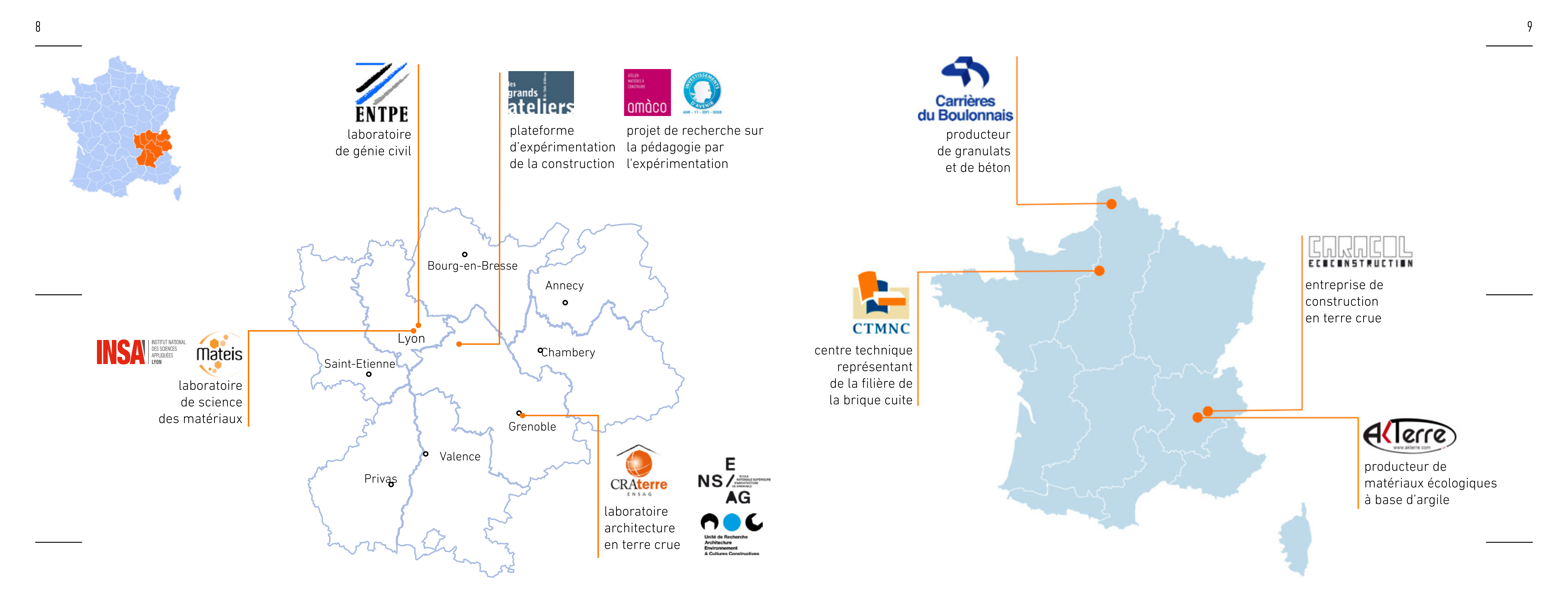
Le projet Béton d'Argile Environnemental a été mené avec l'ambition d'amorcer des recherches sur ces questions scientifiques et d'apporter des réponses concrètes permettant le développement de bétons d'argile. Ce projet a rassemblé 8 partenaires pendant 3 ans, de décembre 2010 à décembre 2013. Des chercheurs de 3 laboratoires (CRAterre-ENSAG, MATEIS-INSA de Lyon, DGCB-ENTPE) ont travaillé en collaboration avec différents acteurs de la filière terre en France : des producteurs de matériaux (groupe CB, AKTERRE), des constructeurs (CARACOL), un centre technique (CTMNC), ainsi qu'avec les Grands Ateliers de Villefontaine, pôle d'enseignement, de recherche et d'expérimentation de la construction en France.

Ce document propose une synthèse des principaux résultats obtenus dans le cadre de ce projet, à destination des concepteurs et des constructeurs.

# Partenaires académiques

# Partenaires industriels





# 0

# CARACTÉRISTIQUES DE LA TERRE CRUE POUR LA CONSTRUCTION

## ÉTAT DE L'ART

Le projet a débuté par un recensement bibliographique des caractéristiques hygroscopiques, mécaniques et thermiques de la terre crue utilisée dans la construction. Seules les données fiables issues d'articles scientifiques, de rapports d'essais et d'ouvrages techniques ont été retenues. Les principaux résultats de cet état de l'art sont synthétisés dans cette première partie.




Crédit (s) : photo Paul Kozlowski ; architecte NAMA architecure

# Les principales techniques de mise en œuvre

Il existe de nombreuses techniques pour l'utilisation de la terre pour la construction. Ces techniques peuvent être regroupées en deux grandes familles en fonction de la consistance à la mise en œuvre :

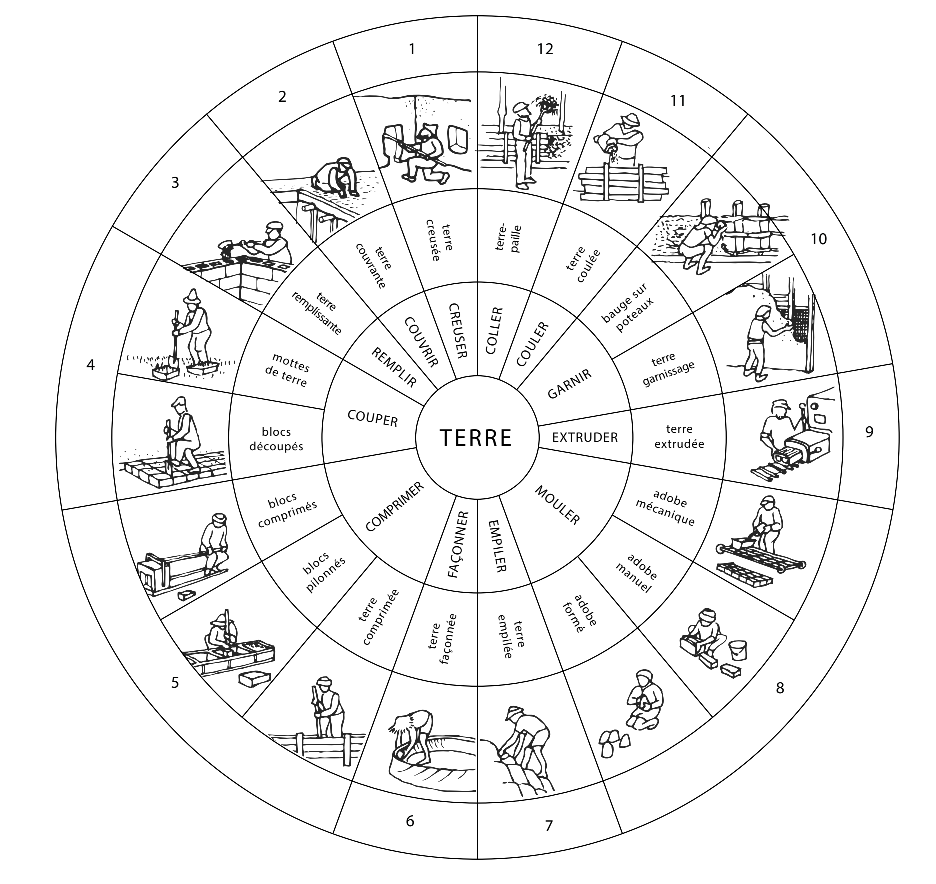
- terre moulée, mise en forme à l'état plastique : adobe, bauge, mortier, enduit ;
- terre compactée à l'état humide, non saturée en eau : pisé, bloc de terre comprimé (BTC).

La terre moulée gagne sa cohésion en séchant. Les particules se resserrent naturellement, sous l'effet de la succion résultant des forces capillaires. Ces techniques engendrent beaucoup de retrait, ce qui peut provoquer de la fissuration. Cela justifie le fait de fabriquer des petites unités à assembler en maçonnerie, ou d'ajouter du sable ou des fibres végétales au mélange pour limiter ce retrait et ponter les fissures.

Dans le cas de la terre compactée, la cohésion est obtenue en grande partie par la compaction, avec un apport d'énergie pour resserrer les particules et densifier le matériau. Puis la phase de séchage apporte sa contribution à la cohésion du matériau. Les techniques de compaction engendrent peu de retrait puisque la quantité d'eau qui se retire pendant le séchage est plutôt faible.
Il est possible d'alléger la terre de manière spectaculaire en lui ajoutant une proportion importante de fibres végétales (terre-paille, torchis). On peut ainsi obtenir un matériau très léger qui peut assurer l'isolation thermique d'un bâtiment.

Une autre technique se développe actuellement, notamment en France : celle des briques extrudées. Ce procédé est utilisé par les briquetiers, qui commencent à commercialiser des produits crus.

BETON D'ARGILE ENVIRONNEMENTAL




↑ **Cette roue des techniques recense 12 techniques connues de construction en terre crue (Houben et Guillaud, 1989). La liste n'est pas exhaustive. Les techniques listées à droite sont celles pour lesquelles des mesures de caractéristiques à l'état sec ont été recensées pour l'état de l'art.**

**Pisé**
Terre à l'état humide comprimée couche par couche dans des coffrages.

**Bloc de terre comprimé (BTC)**
Terre à l'état humide comprimée dans des moules à l'aide d'un petit pilon ou avec une presse.

**Bauge**
Terre à l'état plastique, parfois amendée de fibres, mise en œuvre sous forme de « paquets » façonnés à la main et empilés pour former un mur.

**Adobe**
Terre à l'état plastique, parfois amendée de fibres, moulée sous forme de brique.

**Brique extrudée**
Terre à l'état plastique, parfois amendée de fibres, extrudée et coupée pour former une brique.

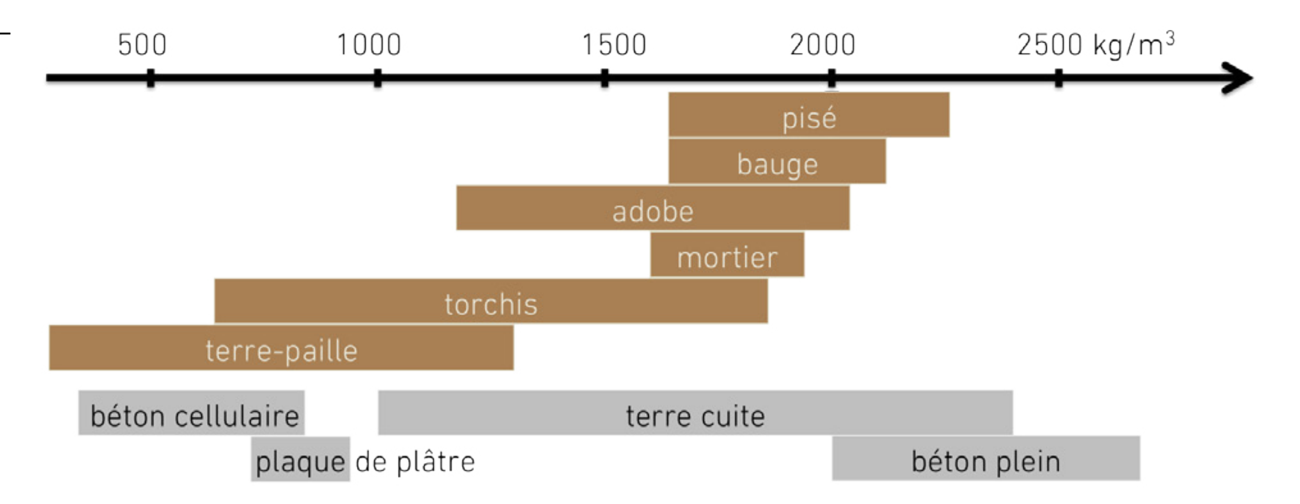
**Torchis**
Terre à l'état visqueux mélangée à de la paille et façonnée sur une armature.

**Mortier**
Terre à l'état visqueux permettant d'assembler des blocs en maçonnerie.

**Enduit**
Terre fine à l'état visqueux, parfois amendée de fibres, appliquée en couche mince sur un support vertical.

**Terre-paille**
Terre fine à l'état liquide mélangée à des fibres végétales (paille, chènevotte), comprimée dans des coffrages en remplissage d'ossature ou moulée pour former des blocs légers.

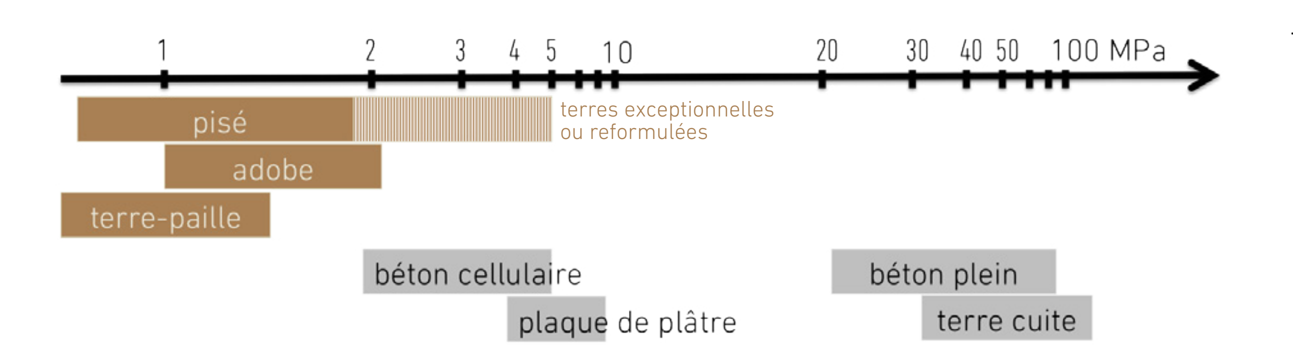
# La masse volumique sèche (ρ)




La masse volumique ou densité sèche (ρ) d'une terre est le rapport entre sa masse et son volume mesurés à l'état sec après passage en étuve à 105°C. Cette propriété dépend de plusieurs paramètres dont les principaux sont la distribution granulométrique, la proportion et la nature de la phase liante, la teneur en eau à la mise en œuvre, et l'énergie de mise en œuvre (compaction, vibrage, etc.).



# La résistance à la compression




Les paramètres qui contribuent à une forte résistance à la compression d'une terre sont :

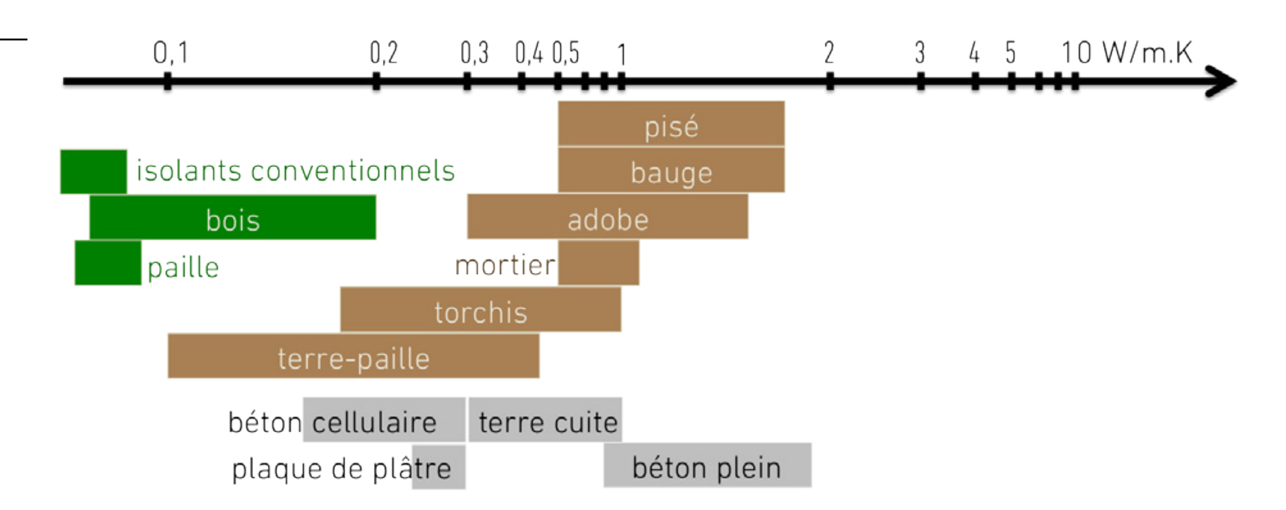
- une masse volumique élevée,
- une faible teneur en eau,
- une forte teneur en argiles et silts,
- la présence d'argiles gonflantes,
- une bonne homogénéité,
- des grains de petite taille.

Dans l'état actuel des connaissances, il n'est pas possible de prédire la résistance à la compression d'une terre sans la mesurer expérimentalement. Connaître la densité, la teneur en eau ou en argiles ne suffit pas. Beaucoup d'autres paramètres entrent en jeu dans les mécanismes de cohésion de la terre qui déterminent sa résistance. Le lien entre la microstructure de la terre et ses propriétés mécaniques macroscopiques est extrêmement complexe.

Les normes imposent souvent des protocoles d'essai qui ne permettent pas de mesurer la résistance intrinsèque au matériau : la mesure peut être influencée par le dispositif d'essai. Cela est dû en partie à la transposition d'essais utilisés pour les bétons de ciment à des normes concernant la terre crue, alors que les propriétés mécaniques de ces deux matériaux sont complètement différentes.

# La conductivité thermique (λ)






La conductivité thermique (λ) indique la quantité de chaleur (en W) qui traverse par m² de surface 1 mètre d'épaisseur de ce matériau pour 1 K d'écart de température entre la face extérieure et la face intérieure. Elle s'exprime en W/m.K. Plus λ est faible, plus le matériau est isolant. Sont considérés comme isolants les matériaux de conductivité inférieure à 0.065 W/m.K.

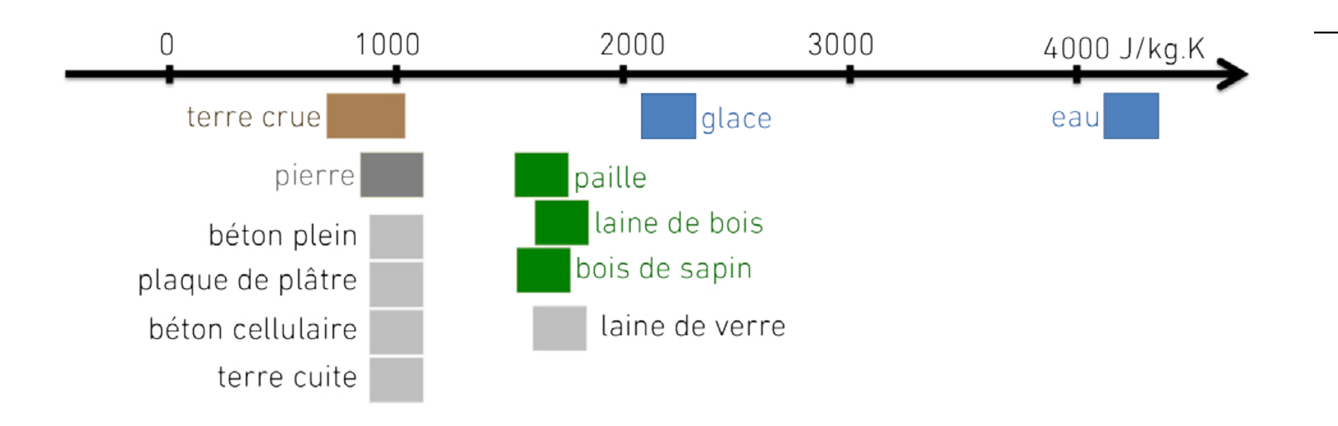
La conductivité d'une terre dépend en premier lieu de sa masse volumique et sa porosité. Elle est de l'ordre de 1,3 W/m.K pour des terres très denses et peut descendre à 0,10 W/m.K pour des mélanges terre-paille de 500 kg/m³.

La conductivité augmente avec la teneur en eau. Pour un pisé de 1800 kg/m³, elle peut passer de 0,8 à 1,0 W/m.K si la teneur en eau passe de 0 à 2 %. Pour une même différence de teneur en eau, la variation de conductivité est plus ou moins marquée en fonction de chaque terre : elles n'ont pas toutes la même sensibilité thermique à l'eau.

La terre seule n'est pas un bon isolant, mais mélangée à des fibres végétales et en épaisseur suffisante, elle peut être utilisée pour l'isolation d'un bâtiment.

# La capacité thermique (c)






La capacité thermique massique (**c**) indique la quantité de chaleur à fournir à 1 kg du matériau pour élever sa température de 1K. Cette propriété multipliée par la masse volumique détermine la capacité thermique volumique du matériau, en J/m³.K, qui est responsable de l'inertie thermique apportée par le matériau à une structure.

La capacité thermique peut se mesurer par calorimétrie : cela consiste à imposer une variation d'énergie à un échantillon et à mesurer sa température, ou l'inverse : imposer à l'échantillon une augmentation de température et mesurer la variation d'énergie.

La capacité thermique peut s'exprimer en fonction des capacités thermiques des constituants du milieu étudié selon une simple loi des mélanges :

$c = \sum u_i.c_i$

où $u_i$ est la proportion massique du constituant i et $c_i$ sa capacité thermique massique.

# Le coefficient de résistance à la vapeur d'eau (**µ**)

1 2 3 4 5 10 20 30 40 50 100

terre crue
béton cellulaire
béton plein
plâtre
crépi synthétique
terre cuite

La capacité d'un matériau à résister à la diffusion de la vapeur d'eau est représentée par le facteur **µ** qui est le rapport entre la perméabilité de l'air à la vapeur d'eau et celle du matériau considéré. Plus ce coefficient est faible, plus le matériau est perméable à la vapeur.

La terre crue a une perméabilité à la vapeur d'eau équivalente au béton cellulaire, au béton de granulats légers, au plâtre et à la terre cuite.

Pour les matériaux hygroscopiques comme la terre, qui peuvent fixer une certaine quantité d'humidité contenue dans l'air, la perméabilité augmente avec l'humidité relative ambiante.

Donc le facteur de résistance à la vapeur d'eau µ diminue lorsque l'humidité relative augmente. En théorie, une seule mesure de perméabilité ne suffit donc pas à caractériser complètement le comportement hygrométrique de la terre.





# Bilan de l'état de l'art

Le monde de la recherche s'étant encore peu intéressé à la construction en terre crue, peu de données expérimentales fiables sont disponibles concernant ce matériau. Il existe également très peu de normes pour la construction en terre, et la plupart concernent la maçonnerie en Blocs de Terre Comprimée (BTC) stabilisés au ciment.
À l'état durci, les propriétés hygrométriques, mécaniques et thermiques dépendent toutes des mêmes paramètres principaux : la porosité totale, la distribution de taille des pores, la teneur en argiles, les types d'argiles, l'empilement granulaire.

La configuration du réseau poreux d'une terre détermine sa sensibilité à l'eau sous forme liquide et à l'humidité. Or l'eau a un rôle clé sur toutes les propriétés d'usage de la terre : les propriétés mécaniques dépendent en grande partie de l'intensité des forces capillaires au sein du matériau ; le comportement thermique de la terre est également influencé par l'eau, notamment par ses changements de phase au sein du matériau en fonction des conditions atmosphériques.

Actuellement les liens entre le réseau poreux et les propriétés mécaniques et thermiques ne sont pas clairement établis : il n'existe aucun modèle prédictif permettant de relier la résistance à la compression aux paramètres microstructuraux.
Le bilan complet de cet état de l'art est disponible dans le rapport final du projet.

Source : Caractéristiques mécaniques, thermiques et hygrométriques du matériau terre crue : bilan de la littérature. (p.93 du Rapport Final du projet BAE (2013) téléchargeable en ligne à l'adresse suivante : http://craterre.org/data/download/c2d2_beton_argile_environnemental_final.pdf)

# 1

# TERRES SÉLECTIONNÉES DANS LE CADRE DU PROJET

Les expérimentations et caractérisations, menées dans le cadre des recherches sur les bétons d'argile, ont été effectuées sur trois terres naturelles sélectionnées en début de projet.


Crédit (s) CRAterre-ENSAG

Crédit (s) CRAterre-ENSAG

Crédit (s) CRAterre-ENSAG

# La terre de Brézins …





Crédit (s) CRAterre-ENSAG

La terre de Brézins en Isère est fournie par Akterre. Elle est extraite des couches supérieures des carrières de granulats qui exploitent des strates plus profondes. Elle est tamisée à 10 mm de manière à enlever les gros cailloux et obtenir une matière première homogène. Elle peut ensuite être amendée en granulats dans des proportions maîtrisées pour construire en pisé. Cette terre est représentative des terres utilisées traditionnellement dans la région du Dauphiné pour construire en pisé.



Crédit (s) : Léa Génis/CRAterre-ENSAG

← La région du Dauphiné bénéficie d'un patrimoine bâti exceptionnel en pisé. Cette technique traditionnelle de construction consiste à compacter de la terre crue à peine humide dans des coffrages.

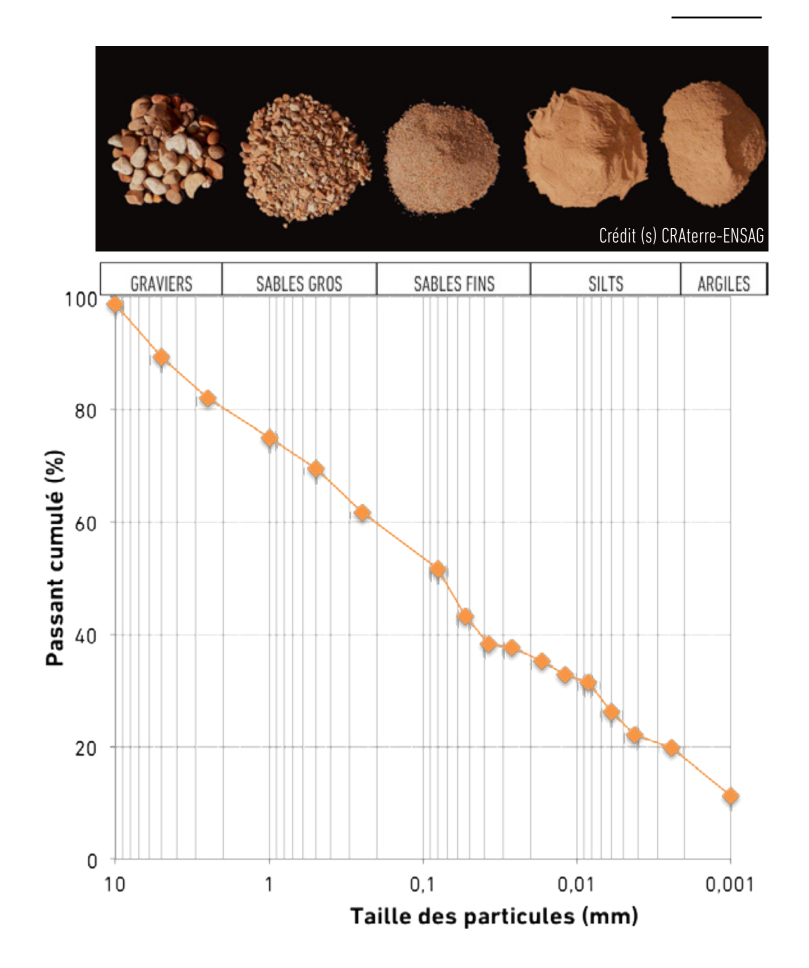
BETON D'ARGILE ENVIRONNEMENTAL

# … dans la tradition du pisé



La terre de Brézins présente un squelette granulaire équilibré, avec la présence des grains de toutes tailles en proportions similaires : des graviers (jusqu'à 10 mm), des sables gros et fins, des silts et des argiles. La proportion d'argiles est de 20 %.

Des analyses minéralogiques non quantitatives ont été faites. Elles montrent la présence de quartz ($SiO_2$), d'argiles (illite, muscovite) et de feldspaths (albite, microcline).




→ La courbe granulométrique de la terre de Brézins a été obtenue par tamisage pour les particules de plus de 0,08 mm, puis par sédimentométrie pour les particules plus fines. Cette courbe indique une proportion d'argiles (<0,002 mm) de 20 %. Le squelette est globalement équilibré avec la présence de toutes les tailles de grains en proportions équivalentes.

# La terre rouge de Royans … … une terre sableuse


Crédit (s) CRAterre-ENSAG







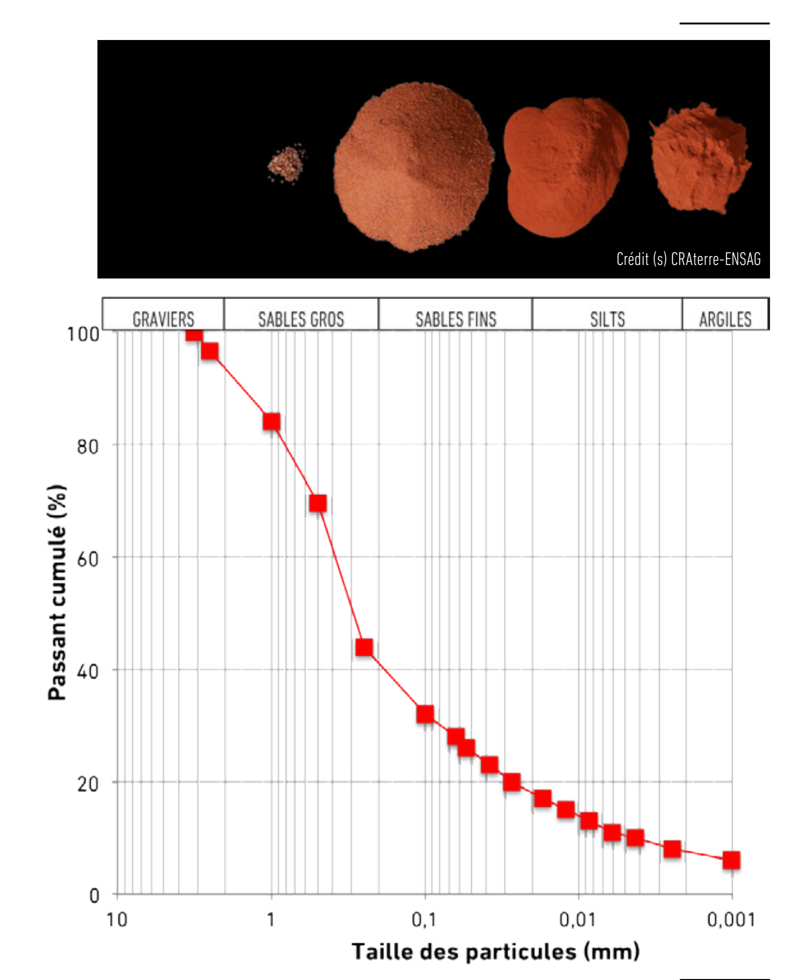
La terre rouge commercialisée par Akterre provient du Pays de Royans. C'est une terre sableuse utilisée pour la réalisation d'enduits. Elle ne contient pas de graviers. Les sables gros (>0,2 mm) représentent 60 % de sa composition.


Crédit (s) : AKTERRE

Cette terre a été sélectionnée initialement pour la présence supposée d'oxydes de fer, qui sont des particules fines comme les argiles et qui participent également à la cohésion de la terre. Mais les analyses chimiques réalisées au cours du projet ne mettent en évidence qu'une quantité faible de fer (3,7 %).

Les analyses minéralogiques montrent par ailleurs la présence de quartz ($SiO_2$), d'argile (kaolinite) et de gœthite (FeO(OH)) qui est un oxyde de fer de couleur jaune.

→ La courbe granulométrique de la terre rouge de Royans a été obtenue par tamisage et sédimentométrie. Elle indique une très forte proportion de sables (environ 60 % de sables gros et 20 % de sables fins). La proportion d'argiles (<0,002 mm) est de 8 %.



BETON D'ARGILE ENVIRONNEMENTAL

# Les fines argilo-calcaires … … un déchet de carrières




Crédit (s) : CRAterre-ENSAG





Les Carrières du Boulonnais produisent des granulats de différentes tailles pour les bétons de ciment. Ces grains sont lavés de manière à éliminer les particules fines argilo-calcaires qui gêneraient la mise en œuvre du béton. Les boues de lavage représentent 8 millions de tonnes de fines argilo-calcaires actuellement inutilisées !

Les fines argilo-calcaires constituent une terre très fine. La taille des plus grosses particules est de 0,1 mm.

La composition de cette terre est suffisamment simple pour permettre une analyse minéralogique quantitative, qui a été réalisée par le fournisseur. Les fines argilo-calcaires contiennent 62 % de calcite ($CaCO_3$), 12 % de kaolinite, 7 % d'illite, 11 % de quartz ($SiO_2$), 5 % de dolomie ($CaMg(CO_3)_2$) et 3 % de gœthite ($FeO(OH)$).

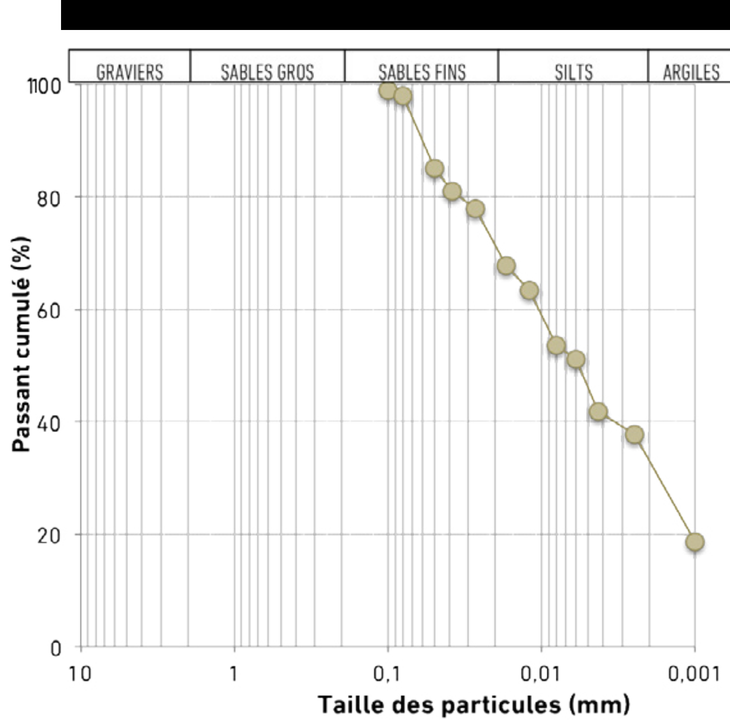
←↓↘ Une carrière de granulats. Les boues de lavage des granulats sont récupérées et stockées en bordure de carrière. Elles forment d'impressionnantes collines de particules fines argilo-calcaires. Ce co-produit constitue une importante ressource minérale à valoriser.

Crédit (s) : Carrières du Boulonnais


Crédit (s) : Carrières du Boulonnais


Crédit (s) : Carrières du Boulonnais






→ La courbe granulométrique des fines argilo-calcaires a été obtenue par tamisage et sédimentométrie. Les plus grosses particules mesurent 0,1 mm. La proportion d'argiles (< 0,002 mm) est de 37 %.

# 2

# RÔLE DE L'EAU SUR LES CARACTÉRISTIQUES DE LA TERRE CRUE

L'état de l'art des caractéristiques de la terre crue a mis en évidence le rôle fondamental de l'eau sur tous les aspects du comportement du matériau.

L'eau est d'abord l'élément qui permet de ramollir la terre pour la mettre en œuvre. Elle est ensuite présente de manière invisible au cœur du matériau qui capte l'humidité de l'air, ce qui influence ses propriétés mécaniques et thermiques.

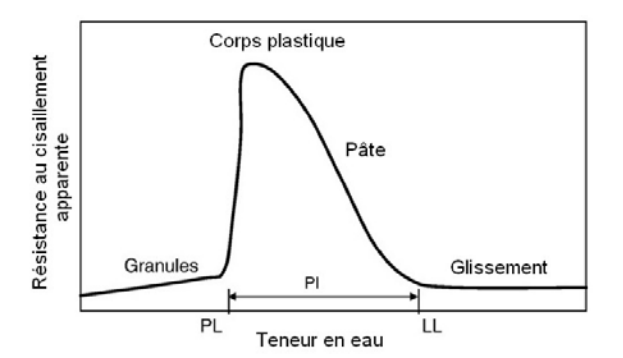


Crédit (s) : amàco

# L'eau pour la mise en œuvre



TERRE FOISONNÉE
préparation
TERRE HUMIDE, PLASTIQUE, VISQUEUSE, LIQUIDE
EAU
humidité
TERRE DURCIE
séchage
mise en forme




↑ **La consistance d'une terre peut être caractérisée par sa résistance au cisaillement. Elle augmente très fortement lorsque la teneur en eau dépasse la limite plastique puis diminue si la quantité d'eau augmente.**

Source : Andrade, FA, Al-Qureshi, HA, Hotza, D (2011). Measuring the plasticity of clays: A review. Applied Clay Science, Vol. 51, N° 1-2, pp. 1 – 7.

La terre utilisée pour bâtir ne requiert que très peu de transformations. Il suffit de la mouiller pour lui donner la consistance adéquate. Puis c'est en séchant que la terre gagne sa cohésion. Si l'on détruit une construction en terre crue, on peut réutiliser la terre à l'identique en lui ajoutant de l'eau et la mettre en œuvre de nouveau. L'utilisation de la terre dans la construction suit donc un cycle de vie très simple dans lequel le principal flux qui intervient est celui de l'eau qui ramollit, plastifie, liquéfie la terre, puis se retire pendant le séchage.

L'eau permet d'ajuster la consistance de la terre. Au fur et à mesure qu'on lui ajoute de l'eau, elle passe par différents états de consistance. **Sèche**, la terre foisonnée n'a aucune cohésion. À l'état **humide**, elle forme des mottes qui peuvent s'agglomérer si on les comprime. Puis si l'on ajoute de l'eau, elle devient d'un seul coup difficile à travailler : la limite **plastique** (PL) est atteinte. Avec encore plus d'eau, elle devient **visqueuse** et oppose moins de résistance. Au-delà de la limite **liquide** (LL) elle s'écoule et ne se laisse plus mettre en forme.

Les limites de plasticité (PL) et liquidité (LL) varient d'une terre à l'autre. Plus elles sont éloignées, plus l'indice de plasticité de la terre considérée (PI = LL - PL) est élevé.



## ESSAIS DE TERRAIN

# Trois terres de plasticités différentes



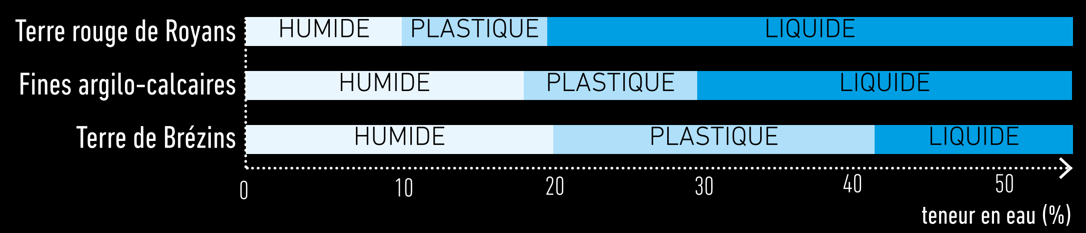
La transition entre les différents états de consistance se produit pour des valeurs de teneur en eau qui dépendent de chaque terre. Les limites de plasticité (PL) et de liquidité (LL) définies par Atterberg sont déterminées par des essais spécifiques effectués sur des terres tamisées à 0,4 mm.

Les trois terres étudiées ici ont des plasticités bien différentes. Par exemple, avec 20 % d'eau la terre rouge de Royans devient liquide alors que la terre à pisé de Brézins passe tout juste de l'état humide à l'état plastique.

Les paramètres qui influencent le plus la plasticité sont la teneur en argiles, la nature des argiles (les argiles gonflantes donnant le plus de plasticité), la teneur en silts.

Ces observations mettent en avant la diversité de comportement des terres pour la construction. L'utilisation de ces terres comme des bétons d'argile dans le secteur du bâtiment passera par des méthodes de reformulation robustes, qui permettront de maîtriser les propriétés finales du matériau malgré des variations importantes de la matière première.

↓ **Les transitions entre l'état humide et l'état plastique, puis entre l'état plastique et l'état liquide, sont déterminées par les essais d'Atterberg. Chaque terre a des limites de consistance bien différentes. Pour une même teneur en eau, une terre peut être à l'état humide, une autre à l'état liquide.**



# Sécher pour durcir



TERRE FOISONNÉE
préparation
TERRE HUMIDE, PLASTIQUE, VISQUEUSE, LIQUIDE
EAU
mise en forme
séchage
humidité
TERRE DURCIE

↘ Une terre coulée dans des coffrages ne peut pas sécher et durcir. Le mur s'effondre au décoffrage.



Une fois mise en œuvre avec la quantité d'eau adéquate, la terre doit sécher pour durcir. Pendant cette phase, des quantités importantes d'eau doivent pouvoir s'évaporer. Par exemple, un mur de 1 m$^2$ en bauge façonné à l'état plastique doit perdre environ 150 kg d'eau pour atteindre son état d'équilibre !

Les durées nécessaires au séchage sont donc très longues et, sans séchage, la terre ne peut pas durcir. Il y a là un défi important à relever dans le développement de nouveaux bétons d'argile coulables et décoffrables rapidement.

Crédit (s) : Le Tiec/CRAterre-ENSAG



## RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

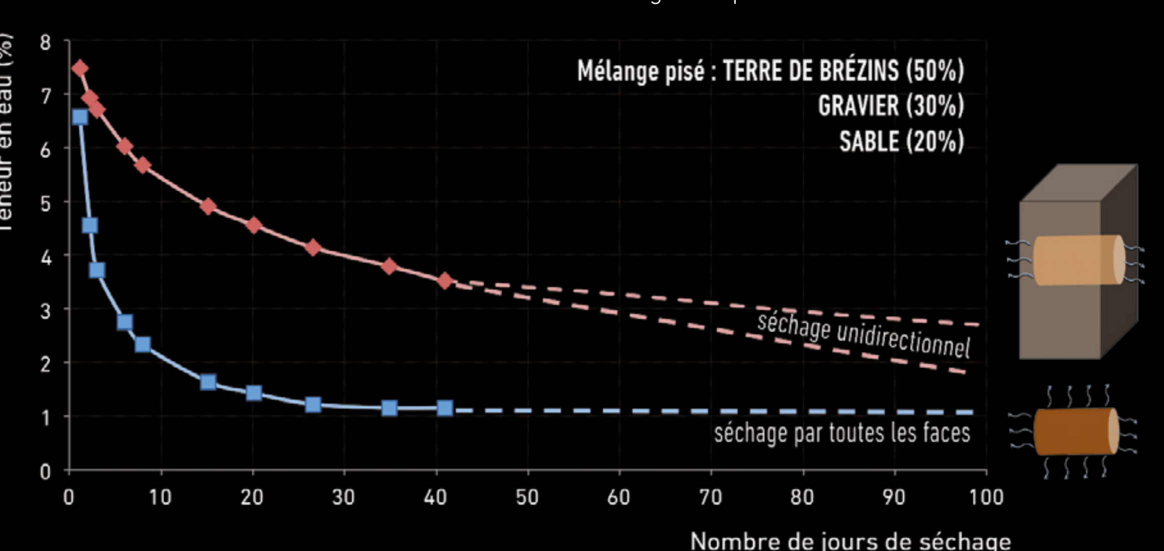
# Un mur en pisé met plusieurs mois à sécher



**↓ Le séchage d'éprouvettes cylindriques en pisé (∅ 16 cm ; H 32 cm) a été suivi pendant 40 jours. Une première série (■) a séché librement par toutes les faces. Une deuxième série (◆) a été emmaillotée de cellophane en laissant libres uniquement les faces planes, de manière à reproduire des conditions de séchage similaires à celles d'un mur d'épaisseur 32 cm. La teneur en eau est mesurée par différence de masse avant et après passage à l'étuve à 105°C. Des extrapolations jusqu'à 100 jours sont proposées (- -).**

Les courbes ci-dessous montrent les cinétiques de séchage d'éprouvettes en pisé stockées en atelier entre avril et juin 2012. Le séchage unidirectionnel est représentatif du séchage d'un mur en pisé de 32 cm d'épaisseur. Ces mesures et les extrapolations que l'on peut en faire montrent qu'un tel mur stocké dans les mêmes conditions met entre 4 mois et un an à atteindre son état d'équilibre. Or le matériau est ici mis en œuvre à l'état humide avec relativement peu d'eau (8 %).

Le défi de couler des murs en béton d'argile fluide réside en grande partie dans la maîtrise de la quantité d'eau nécessaire à la mise en œuvre, et dans la capacité du matériau à durcir avant le séchage complet.



# La terre et l'humidité de l'air

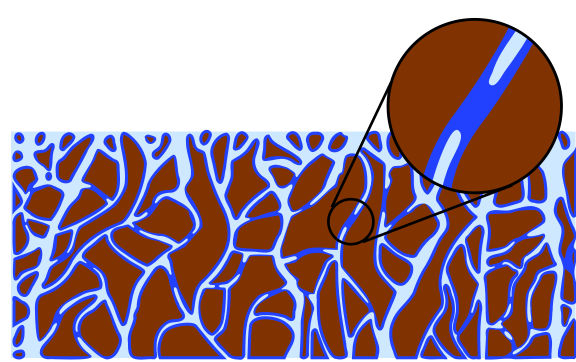


TERRE FOISONNÉE
préparation
TERRE HUMIDE, PLASTIQUE, VISQUEUSE, LIQUIDE
EAU
humidité
TERRE DURCIE
séchage
mise en forme

Après la phase de séchage, la terre atteint un état dans lequel sa masse reste à peu près constante. Le matériau est alors en équilibre avec le milieu ambiant et se charge plus ou moins d'eau en fonction de la température et de l'humidité de l'air.

La terre est un matériau poreux et hygroscopique. L'eau contenue dans l'air ambiant peut donc s'adsorber sur les surfaces de pores accessibles, et se condenser dans les pores par le phénomène de condensation capillaires. Plus il y a de porosités et plus ces porosités sont fines, plus la terre peut se charger en humidité.

↑ Représentation schématique du réseau poreux d'un matériau hygroscopique. Lorsque l'humidité ambiante est élevée, la surface des pores est recouverte d'une fine couche de molécules d'eau adsorbées.



↑ Si les pores du matériau sont suffisament fins, les couches d'eau adsorbées se touchent par endroit : il y a condensation capilaire.



## RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

# L'équilibre hygroscopique de la terre crue

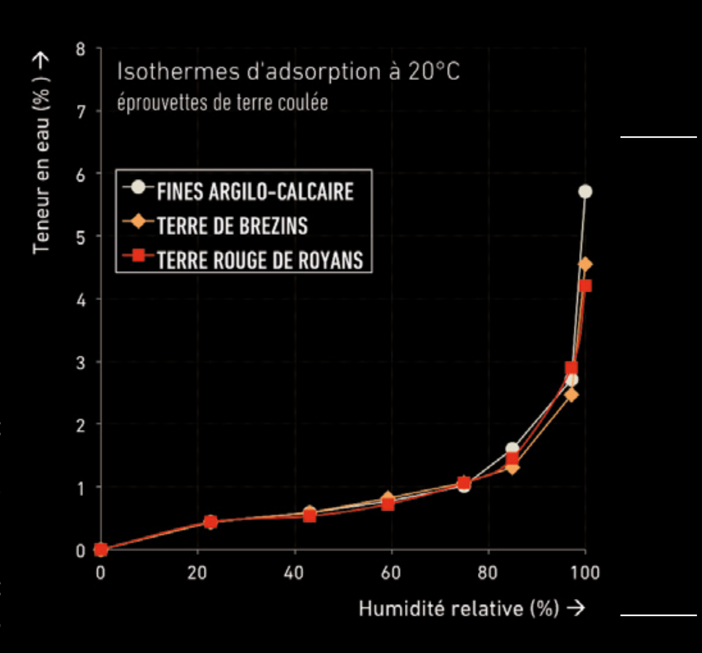


La terre absorbe plus ou moins d'humidité en fonction de la température et de l'humidité relarive ambiante. Les isothermes d'adsorption et de désorption permettent de connaître, pour une température donnée, la teneur en eau fixée par la matériau lorsqu'il est à l'équilibre. Ces caractérisations sont très longues puisque chaque point de mesure est le résultat de plusieurs semaines de stabilisation sous une condition atmosphérique choisie.

Les isothermes d'adsorption à 20°C ont été tracés pour les trois terres sélectionnées dans le cadre de ce projet mises en œuvre par coulage. Les trois courbes obtenues sont similaires.
À 20°C, la teneur en eau de ces terres varie de 0,5 % lorsque l'humidité relative passe de 20 à 70 % puis de 1% lorsqu'elle passe de 70 à 90 %. Des variations bien plus importantes peuvent être attendues dans des conditions climatiques réelles où la température varie de manière importante.



→ Les mesures d'adsorption de vapeur d'eau sont effectuées sur des échantillons de terre de quelques cm³.
Crédit (s) : BAE-Lionel Ronsoux/ENTPE




→ À partir d'un état sec, l'échantillon est placé dans une enceinte à 20 %HR-20°C jusqu'à ce que sa masse soit stable. On mesure la prise de masse. Puis l'échantillon est soumis à 40 % HR... ainsi de suite. La teneur en eau des éprouvettes a été calculée à partir de pesées avant et après un séchage à 105°C.

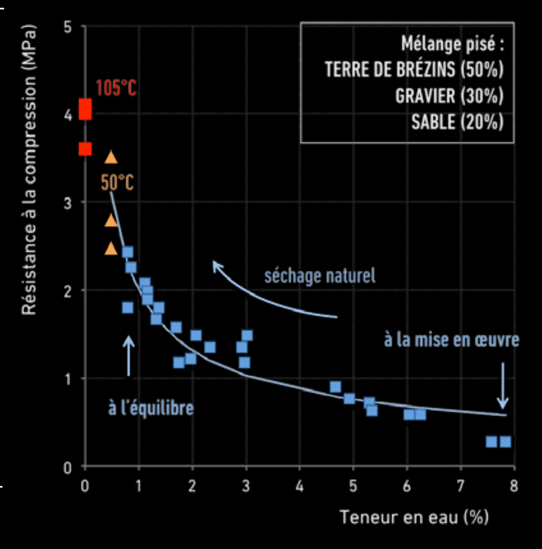
## RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

# L'eau pénalise la résistance mécanique



Une campagne d'essais a été menée pour caractériser l'influence de la teneur en eau sur la résistance mécanique d'une terre. Il s'agit ici d'un mélange de terre de Brézins, de sables et de graviers mis en œuvre par compaction humide, comme le pisé. Les résultats ci-dessous montrent que la résistance mécanique est directement corrélée à la teneur en eau des éprouvettes au moment de l'essai : plus la teneur en eau est faible, plus la résistance est élevée.

Lorsque le matériau est « sec » en atmosphère ambiante, sa résistance mécanique est sensible à de petites variations de teneur en eau. Ainsi une augmentation de 0,5 % de teneur en eau peut diminuer la résistance à la compression 1 MPa. À l'état d'équilibre sous atmosphère ambiante, la terre contient encore de l'humidité. Si on la sèche à 50°C, puis à 105°C, on constate encore une perte de masse (départ d'eau) accompagnée d'une augmentation importante de résistance.




← Des cylindres de pisé ont été préparés avec une terre contenant 8% d'eau en masse. Des mesures de résistance à la compression ont été réalisées au cours du séchage. La teneur en eau des éprouvettes a été calculée à partir de pesées avant et après un séchage à 105°C.

→ Une éprouvette sollicitée en compression uniaxiale pure, sans artefacts, se rompt selon des plans verticaux. L'observation des fissures après rupture permet de valider la qualité de l'essai réalisé.



Crédit (s) : BAE-Lionel Ronsoux/INSA Lyon



## CONSÉQUENCES SUR LE TERRAIN

# Pathologie humide du pisé



Fuite toit ou chéneau
Doublage étanche avec isolation
Enduit étanche (ciment, hydrofuge, peinture)
PISÉ
Isolation extérieure
Bitume étanche et contrepente
Dalle étanche
Sol surélevé
Enduit étanche
polyane, isolation
Drain plus bas que les fondations

Crédit (s) : Pascal Scarato/ ABITerre et Thierry Loison

Les conséquences d'une accumulation d'humidité dans un mur en terre crue peuvent être catastrophiques. De nombreuses maisons en pisé se sont effondrées durant ces dernières années en Isère, suite à l'accumulation d'eau au sein du matériau qui en perd sa tenue mécanique.
Les causes de cette humidifaction sont multiples : infiltration par les soubassements, montée du niveau de la chaussée au dessus des soubassements, revêtements étanches qui s'opposent au passage de l'eau liquique et vapeur et donc qui empêchent le séchage, etc.
Le problème s'est aggravé ces dernières années : dans un souci d'économie d'énergie, les bâtiments sont isolés et rénovés avec des matériaux étanches à la vapeur d'eau. Cela empêche l'évacuation de l'eau qui s'accumule dans le mur, jusqu'au jour où le matériau devient trop faible pour supporter son propre poids et celui de la toiture.

Un mur en terre crue est capable de supporter l'absorption d'eau jusqu'à un certain point. S'il peut évacuer l'eau absorbée en séchant, il est capable de résister pendant des siècles aux intempéries.

↑ Les causes d'humidification d'un mur en pisé sont multiples et peuvent donner lieu à des pathologies graves. Il est indispensable que le matériau puisse respirer pour sécher, aussi les revêtements étanches à l'eau liquique et vapeur sont à proscrire.

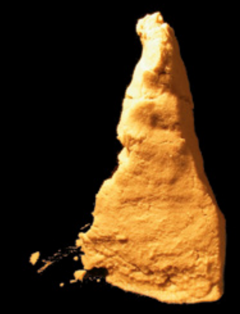
→ De nombreuses maisons en pisé se sont effondrées ces dernières années, par manque d'entretien ou suite à des rénovations inadaptées.



Crédit (s) : Philippe Heitz/AQC

## RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

# L'eau est pourtant une source de cohésion





L'eau pénalise la résistance de la terre crue…
Et pourtant, la physique du château de sable nous enseigne que l'eau est responsable de la cohésion entre les grains de sable. Sans eau, le château s'écroule.

Pourquoi n'en est-il pas de même avec la terre ? Pourquoi est-elle encore plus résistante après un séchage à 105°C ?

Perte de masse (%)
Analyse Thermique Différentielle (µV/mg)
TERRE À PISÉ DE BRÉZINS
ATG
ATD
départ d'eau zéolithique
340.0°C
444.0°C
départ de matières organiques
122.1°C
102, 100, 98, 96, 94, 92, 90
0.20, 0.15, 0.10, 0.05, 0.00, -0.05, -0.10
100, 200, 300, 400, 500
Température (°C)

Les résultats de l'analyse thermique différentielle effectuée sur la terre de Brézins montrent une absorption d'énergie par l'échantillon accompagnée d'une perte de masse entre 80°C et 220°C. Ce phénomène est attribué au départ de l'eau « zéolithique ». Un chauffage à 105°C n'est donc pas suffisant pour évacuer toute l'eau de la terre, qui bénéficie encore de la cohésion apportée par des ponts capillaires microscopiques entre les plaquettes d'argile.

**← L'analyse thermique différentielle effectuée en laboratoire permet de mesurer d'une part la perte de masse d'un matériau au fur et à mesure qu'on le chauffe, et d'autre part la quantité d'énergie qu'il libère ou qu'il absorbe par rapport à un échantillon témoin qui ne subit aucune réaction ni changement de phase dans la gamme de température explorée.**

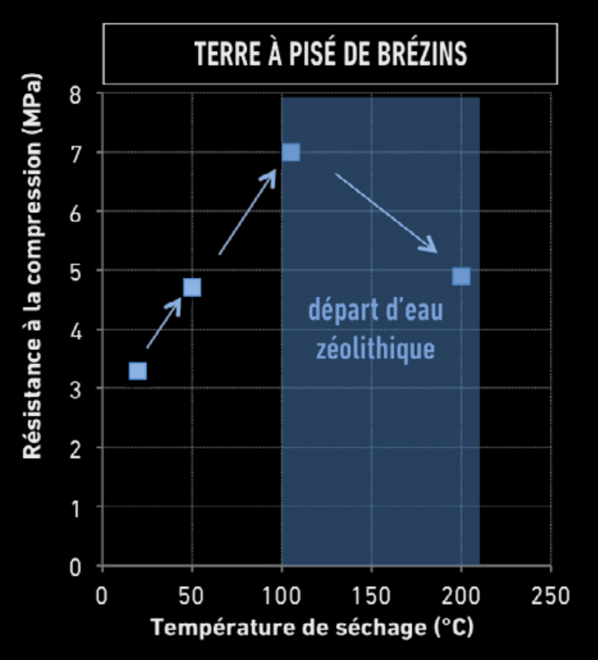
**→ À l'échelle microscopique, les ponts capillaires formés entre les plaquettes d'argile jouent un rôle important dans la cohésion du matériau.**



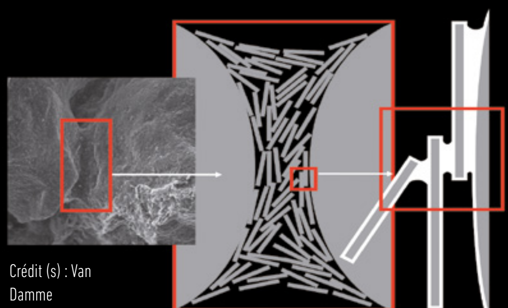


**← En séchant, le pâté de sable mouillé redevient simple tas de sable impossible à mettre en forme. La cohésion apportée par les ponts capillaires s'est évaporée.**






**↙ Des éprouvettes de pisé réalisées avec la terre de Brézins ont été séchées à différentes températures puis caractérisées en compression. La résistance passe de 3,3 MPa à 7 MPa après un séchage à 105°C, puis elle diminue suite au départ de l'eau qui assure une cohésion capillaire entre les feuillets d'argile.**



Crédit (s) : Van Damme

Comme cela était le cas avec la terre de Brézins reformulée (page précédente), une augmentation de résistance importante est mesurée sur la terre de Brézins pure après un séchage à 105°C : la résistance passe de 3,3 MPa à 7 MPa.
Au-delà de cette température, la résistance diminue : les éprouvettes séchées à 200°C ont une résistance de 5 MPa, comparable à celle des éprouvettes séchées à 50°C. Cette baisse de résistance est attribuée à la perte des ponts capillaires microscopiques formés par l'eau zéolithique.

Ce résultat notable confirme que l'eau joue un rôle dans la cohésion de la terre crue. Il montre également que l'eau n'est pas l'unique source de cohésion puisque la résistance après un traitement à 200°C est encore élevée. Les forces électrostatiques entre les feuillets d'argile et les forces de Van Der Waals contribuent également à la cohésion lorsque les feuillets sont très proches, distants de moins de 1 nm.
En écartant les feuillets, l'excès d'eau diminue ces forces cohésives.

# L'eau et l'inertie thermique



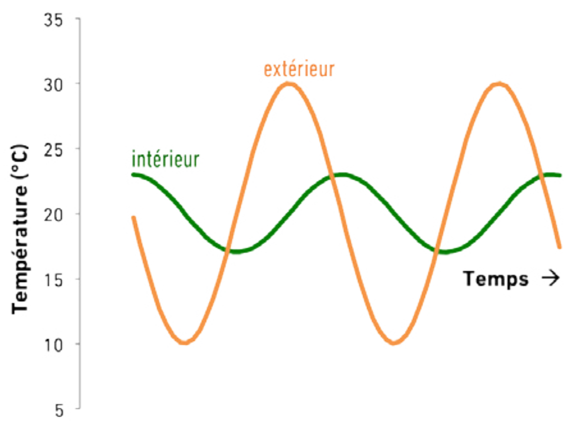
La terre est un matériau complexe car constitué de grains solides, d'air et d'eau. Complexe également dans sa microstructure : des grains de différentes tailles, du nanomètre au centimètre délimitent un réseau de pores complexe également dans lequel des molécules de vapeur d'eau peuvent s'adsorber sur les parois, se condenser sous forme de ponts capillaires ou simplement sous forme d'eau liquide dans de grosses cavités.

Comment se font les transferts thermiques dans un tel matériau ? Comment cela se traduit-il en termes de performances du bâtiment et de confort thermique ?

## Inertie thermique

L'inertie est la capacité à stocker la chaleur et à la restituer lentement. Elle permet de déphaser les variations de température à l'intérieur d'un bâtiment par rapport à l'extérieur et d'amortir les écarts de température. Ainsi, par exemple, un mur à forte inertie exposé au soleil emmagasine de la chaleur pendant la journée et la restitue lentement à l'intérieur de la maison en fin d'après-midi.

L'inertie thermique dépend avant tout de la capacité thermique massique des matériaux et de leur masse volumique : plus un matériau est lourd, plus il apporte de l'inertie au bâtiment.




↑ Un bâtiment à forte inertie permet d'amortir les variations de température à l'intérieur du bâtiment et de déphaser les pics de chaleur et de fraîcheur.

Beaucoup de maisons traditionnelles en terre crue possèdent une bonne inertie thermique car leurs murs sont épais et denses (1600 à 2000 kg/m$^3$) avec une capacité thermique massique de 800 à 1000 J/kg.K. Le confort naturel d'été y est meilleur que dans des maisons modernes qui nécessitent une climatisation pour atteindre les mêmes températures intérieures.

# La terre, matériau à changement de phase naturel



## Le rôle de l'eau

L'eau condensée présente dans la terre participe au stockage de chaleur. Sa capacité thermique massique est 4 à 5 fois supérieure à celle de la terre sèche (4180 J/kg.K). Ainsi, 3 % en masse d'eau dans un mur en terre contribuent à hauteur de 10 % à la capacité thermique globale.

L'eau apporte également une autre forme d'inertie, appellée inertie latente. En fonction des conditions extérieures, elle change d'état, s'évapore ou se condense au gré des fluctuations thermiques et hygrométriques ambiantes. Or, le passage de l'état liquide à l'état gazeux absorbe de l'énergie, et le passage inverse libère la même quantité d'énergie sous forme de chaleur.

Ces échanges sont favorables au confort intérieur : en été, les conditions atmosphériques extérieures provoquent l'évaporation d'une partie de l'eau contenue dans la terre, et cette évaporation consomme de l'énergie, ce qui tend à diminuer localement la température. Inversement, quand la température extérieure devient plus fraîche, la pression de vapeur saturante diminue, entraînant de la condensation dans le mur en terre. Ce changement de phase libère de l'énergie, réchauffant localement l'atmosphère.

Des mesures montrent que le refroidissement dû à l'évaporation de l'eau est remarquable sur un bâtiment recouvert d'un enduit en terre. Pour donner un ordre de grandeur, la chaleur latente de vaporisation de l'eau étant de l'ordre de 2400 kJ/kg, un mur en pisé d'épaisseur 50 cm dont la teneur en eau varie de 1 % en fonction des conditions extérieures dégage ou absorbe 23MJ/m$^2$.

La terre est capable d'échanger des quantités d'eau bien plus importantes que d'autres matériaux de construction comme le plâtre ou le ciment. Elle bénéficie donc d'une inertie latente plus importante.

# L'eau et la conductivité



## MÉCANISMES DE TRANSFERT

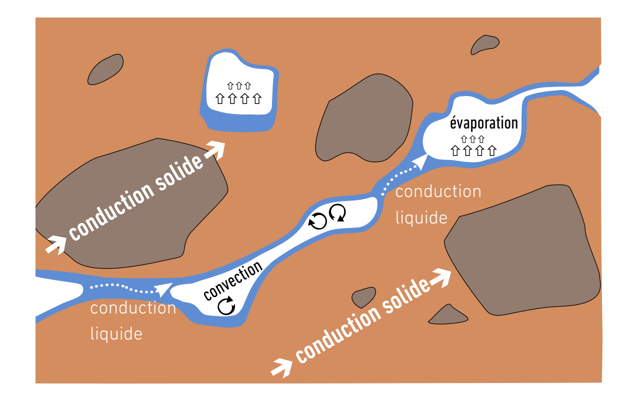
Le transfert de chaleur dans la terre crue est lié à plusieurs mécanismes : conduction dans différentes phases solides, conduction dans l'eau condensée, convection dans la phase gazeuse des porosités, évaporation de l'eau qui absorbe de la chaleur ou condensation de la vapeur d'eau qui libère de l'énergie.

Les codes de calcul actuellement utilisés dans la réglementation thermique considèrent la terre crue comme un matériau solide homogène, une approximation bien discutable.

## CONDUCTIVITÉ THERMIQUE

La conductivité thermique (λ) d'un matériau correspond à la quantité de chaleur qui traverse 1 m d'épaisseur de ce matériau par mètre carré de surface pour 1 °C (ou 1K) d'écart de température entre la face extérieure et la face intérieure. Cette grandeur détermine la résistance thermique d'un mur en terre ($R_{th}$ = épaisseur / λ), autrement dit sa capacité d'isolation : plus λ est faible, plus le matériau est isolant. Sont considérés comme isolants les matériaux de conductivié inférieure à 0,065 W/m.K.

↓ Le transfert de chaleur dans la terre crue est complexe car c'est un matériau constitué de plusieurs constituants solides, d'air et d'eau. Plusieurs mécanismes interviennent.




Définir la conductivité dans un matériau poreux hygroscopique comme la terre est complexe car plusieurs mécanismes de transfert interviennent dans trois phases différentes (terre, eau, air). La valeur de conductivité accessible par la mesure est une conductivité apparente, qui peut varier selon la technique expérimentale utilisée.

L'eau liquide présente une conductivité thermique 30 fois supérieure à celle de l'air sec. Sa présence dans les porosités de la terre crue est variable en fonction de l'humidité et de la température. Cela affecte la conductivité thermique apparente de la terre.

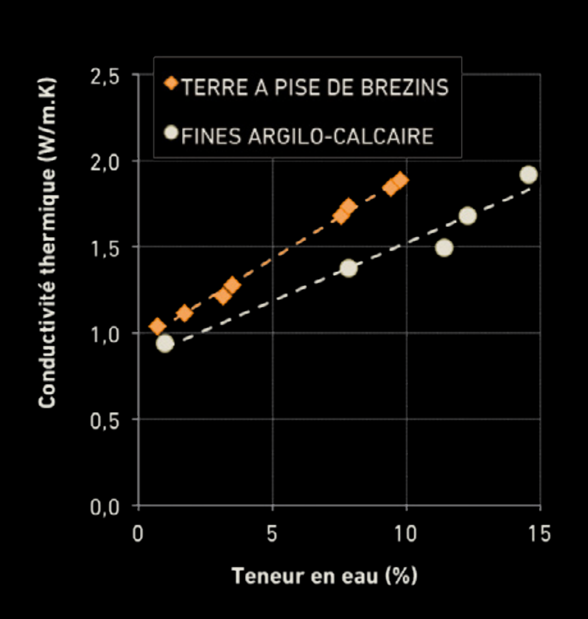


### RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

# Conductivité de la terre humide



Des mesures de conductivité thermique ont été faites sur des échantillons de terre de Brézins et de fines argilo-calcaires pour différentes valeurs de teneur en eau pondérale. La technique utilisée est celle du fil chaud qui permet de mesurer la conductivité thermique de matériaux de manière très rapide en régime transitoire, ce qui ne perturbe pas trop le milieu à caractériser. L'élévation de température est faible, locale, et on peut supposer qu'elle ne fait pas intervenir de phénomènes d'évaporation ou condensation.




Les résultats présentés ci-contre montrent que la conductivité thermique augmente de manière linéaire avec la teneur en eau. La sensibilité à l'eau (i.e. la pente des courbes) est différente pour chaque terre.

Ces résultats concordent avec ceux de la littérature scientifique qui mentionne des relations linéaires entre conductivité et teneur en eau avec des valeurs de sensibilité similaires comprises entre 0,07 et 0,15 W/m.K pour 1 % de teneur en eau.

On peut retenir qu'une élévation de 1 % de teneur en eau conduit à une augmentation de conductivité de l'ordre de 0,1 W/m.K, soit environ 10 % par rapport au matériau sec.

← La conductivité thermique d'une terre dépend de sa teneur en eau. C'est ce que montrent ces mesures réalisées sur la terre de Brézins et les fines argilo-calcaires avec la technique du fil chaud.

## RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

# Grâce à l'eau, le transfert de chaleur est ralenti

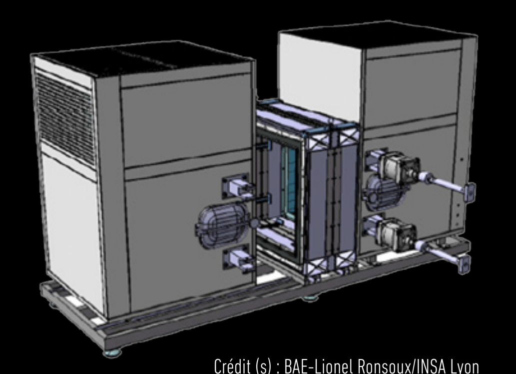
Le département DGCB de l'ENTPE est équipé d'une double-enceinte climatique qui permet de mesurer le comportement hygrothermique de murets de 1 m², en imposant des conditions variables de température et d'humidité de part et d'autre du muret.

Un muret en pisé a été réalisé avec la terre de Brézins 0-20 mm et caractérisé dans la double-enceinte après 18 mois de séchage.

L'essai consiste à placer le muret à l'interface entre deux chambres. L'une reste à température et humidité relative constantes (20°C, 50 % HR).

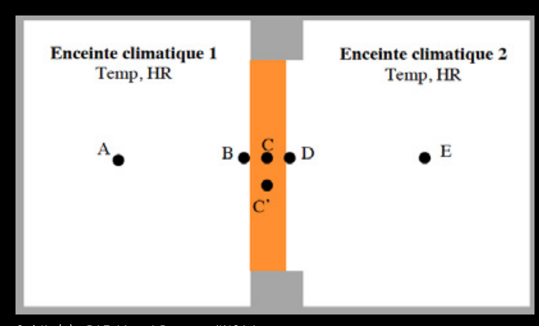
L'autre chambre subit quatre paliers successifs de 24h : (20°C, 50 %HR) ; (10°C, 80 %HR) ; (40°C, 45 % HR) ; (20°C, 50 %HR). Des capteurs de température et d'humidité sont placés au cœur et à la surface du muret.

Les mesures expérimentales au cœur du muret ont été confrontées aux résultats d'une simulation par éléments finis, qui considère que le matériau est un solide homogène de 2000 kg/m³, de conductivité thermique 1 W/m.K et de capacité thermique 830 J/kg.K. Les changements de phase de l'eau dans le matériau sont négligés dans les calculs.



Crédit (s) : BAE-Lionel Ronsoux/INSA Lyon

↑ **Cette double-enceinte climatique permet de mesurer le comportement hygrothermique d'un muret exposé à des variations de température et d'humidité.**




Crédit (s) : BAE-Lionel Ronsoux/INSA Lyon

↑ **Le mur test (orange) est placé à l'interface entre les deux chambres climatiques. Des capteurs de température et d'humidité (A à E) sont placés à différents endroits.**



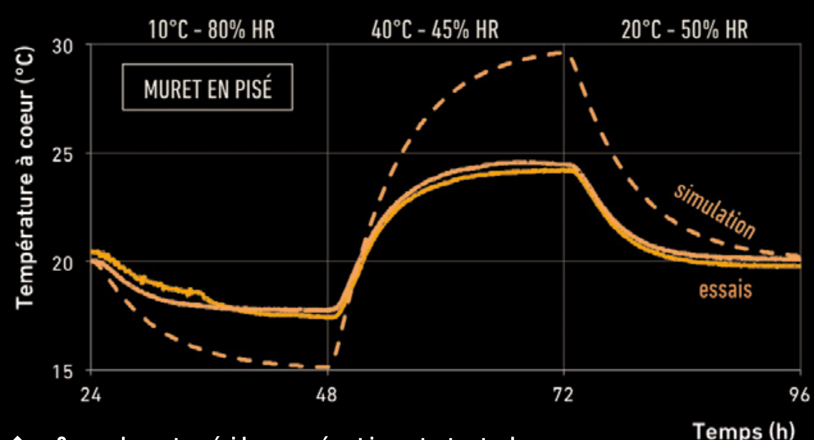
← **Un muret en pisé a été caractérisé dans ce dispositif.**
Crédit (s) : BAE-Lionel Ronsoux/INSA Lyon

Lorsque la température extérieure diminue, d'un côté du muret, la température mesurée au cœur du matériau diminue puis se stabilise rapidement à une température supérieure à celle que l'on prévoit par simulation. Inversement, quand la température extérieure augmente d'un côté du muret, celle mesurée au cœur augmente relativement peu et se stabilise.

La variation de température mesurée est environ deux fois plus faible que celle prévue par la simulation avec une conductivité de 1 W/m.K.

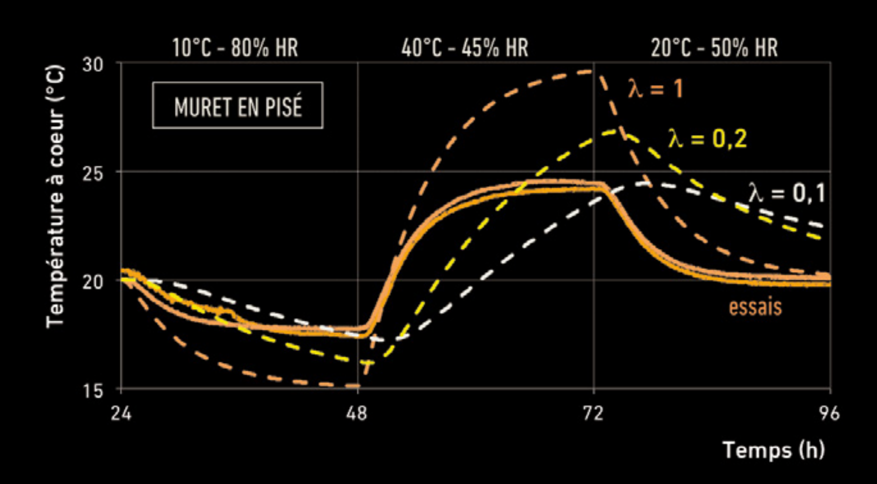
Si l'on refait la simulation avec une conductivité de 0,1 W/m.K, l'écart de température au bout de 24h correspond à celui qui est mesuré expérimentalement, mais on voit bien à l'allure des courbes que le comportement réel est encore très différent de celui simulé. La valeur de capacité thermique a très peu d'influence sur le résultat.

Ces différences importantes entre essais et simulations montrent que les hypothèses faites pour la simulation ne sont pas valables. Il ne suffit pas de prendre en compte la conductivité et la capacité thermique du matériau : il faut également inclure dans le modèle les changements de phase de l'eau présente dans le matériau.




↑ **Ce graphe met en évidence un écart important entre les mesures expérimentales de température au cœur du muret et la prévision obtenue par un modèle aux éléments finis.**

↓ **La valeur de conductivité thermique a une grande influence sur le résultat de la simulation, mais elle ne permet pas de reproduire le comportement réel.**



# 3

# BÉTONS D'ARGILE À HAUTES PERFORMANCES HYGRO-THERMIQUES

L'eau joue un rôle clé dans le comportement hygrothermique de la terre crue. En s'évaporant et en se condensant, l'eau apporte de l'inertie thermique latente et une régulation de température importante au matériau.

Et si l'on pouvait exacerber ce phénomène de changement de phase en adsorbant des quantités d'eau plus importantes ? Comprendre la physique de l'eau au sein de la terre crue et des fibres végétales permet d'imaginer de nouveaux matériaux.



Crédit (s) : BAE-Les Grands Ateliers

# La chènevotte, une fibre ...



Les bétons de chanvre sont de plus en plus utilisés dans le secteur de la construction pour leurs propriétés isolantes et « perspirantes », c'est-à-dire perméables à la vapeur. Ils sont constitués de particules légères de chènevotte agglomérées par de la chaux.

La chènevotte est issue de la tige de la plante de chanvre. Sa masse volumique en vrac avoisine 110 kg/m$^3$ et sa conductivité thermique est de 0,048 W/m.K, ce qui est très faible. La masse de la chènevotte est composée à 90 % de cellulose, d'hémicellulose et de lignine. L'air occupe 92 % du volume total des particules de chènevotte en vrac. Cet air est en grande partie emprisonné au sein des particules qui contiennent 78 % de porosité interne.

La tige du chanvre possède des capillaires de différentes tailles qui jouent un rôle de transmission de la sève le long de la tige. À l'état sec, ces capillaires sont vides et constituent la plus grande partie de la porosité des particules végétales. On observe deux tailles caractéristiques de capillaires : 10 et 100 µm.



Crédit (s) : CETIOM

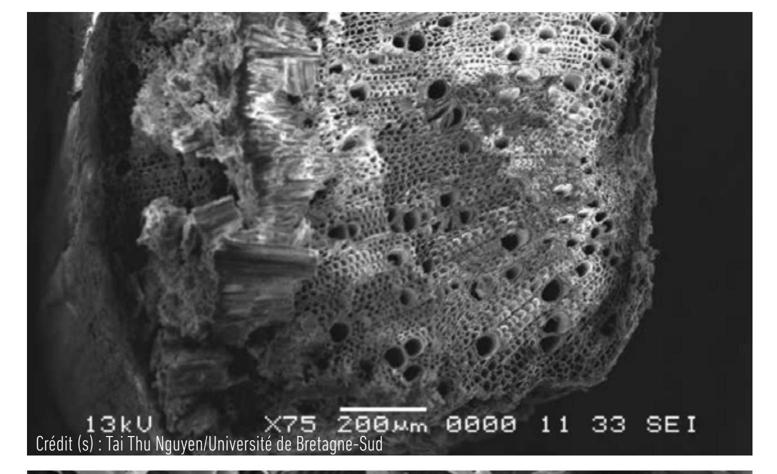


Crédit (s) : CETIOM

↑ La plante de chanvre récoltée puis séchée permet d'obtenir, après défibrage et broyage de la tige de la plante, deux coproduits : des fibres (issues de l'enveloppe extérieure de la tige) et des particules de bois appelées chènevotte.

# ... poreuse et hygroscopique







Crédit (s) : Tai Thu Nguyen/Université de Bretagne-Sud





Crédit (s) : Tai Thu Nguyen/Université de Bretagne-Sud

La microstructure de la chènevotte, faite de fins capillaires, permet un transport rapide d'eau liquide dans les particules. La chènevotte peut ainsi absorber jusqu'à 4 fois sa masse en eau. Cette absorption est beaucoup plus importante que celle des autres granulats légers utilisés dans la construction car la porosité est ouverte et fine.

Cette forte capacité d'absorption a des conséquences lors de la mise en œuvre des bétons de chanvre (perte de fluidité, retard de prise des liants hydrauliques comme le ciment) puis sur le comportement hygroscopique d'usage de ces matériaux (meilleure régulation de l'humidité ambiante, forte inertie latente).

← Ces deux images obtenues en microscopie électronique à balayage montrent la microstructure d'une tige de chanvre vue en coupe.

**Source : Nguyen, TT (2010). Contribution à l'étude de la formulation et du procédé de fabrication d'éléments de construction en béton de chanvre. Thèse de doctorat SICMA, Université de Bretagne Sud, 268 p.**

BETON D'ARGILE ENVIRONNEMENTAL

# Bétons terre-chanvre



Pour obtenir des bétons d'argile à haute performance hygrothermique, l'enjeu consiste à maximiser la porosité fine du matériau. Dans un béton classique, les granulats sont denses et ne participent pas à l'absorption d'humidité. L'idée ici est donc de les remplacer par des granulats poreux et hygroscopiques, des particules de chènevotte.

Pour l'élaboration des bétons terre-chanvre, seule la partie fine de la terre est intéressante pour assurer la cohésion entre les granulats végétaux. Il est donc conseillé de la tamiser au préalable pour retirer les graviers.

La terre est préparée sous la forme d'une barbotine liquide dans une bétonnière ou dans un malaxeur planétaire. Les particules de chènevotte sont ajoutées peu à peu dans le mélange. La consistance peut encore être ajustée en ajoutant de l'eau. Puis le matériau est mis en forme par compaction en couches de 5 cm environ.

La qualité du liant argileux est déterminante pour l'élaboration de bétons terre-chanvre. La terre utilisée doit être fine et cohésive, collante, pour assurer la tenue des particules de chènevotte. La terre rouge de Royans est, par exemple, trop sableuse. Les composites obtenus avec cette terre sont friables.

↓ Terre fine préparée sous forme de barbotine liquide

Particules de chenevotte ↓



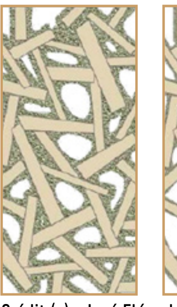




Bloc de terre-chanvre ↑

→ Le dosage de liant par rapport à la chènevotte est ajustable pour obtenir des matériaux plus ou moins denses.





Schémas (p.51-53) - Crédit (s) : José Flémal et Arnaud Evrard

**RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX**

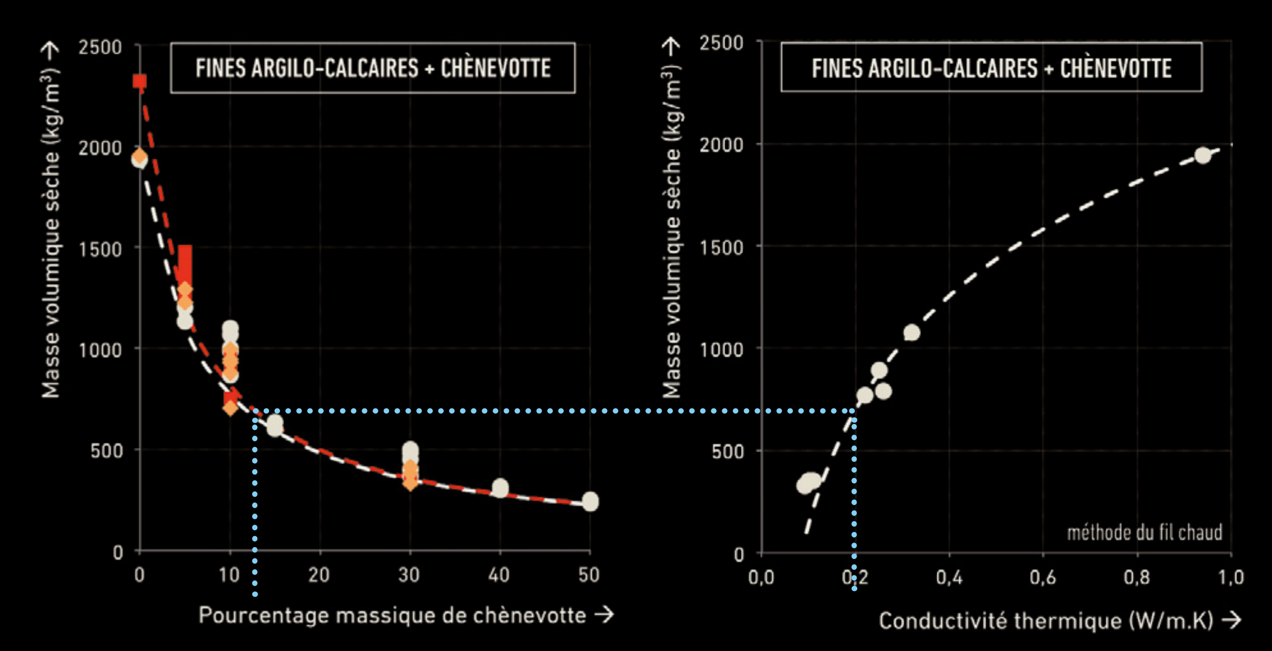
# Formulation de bétons terre-chanvre



En associant la chènevotte, très légère et poreuse, à un liant argileux dense, on peut fabriquer toute une gamme de matériaux de densité variant de 300 à 1500 kg/m³, de conductivités thermiques variant de 0,1 à 1 W/m.K.

Les relations obtenues expérimentalement entre la proportion massique de chènevotte (par rapport à la masse sèche totale), la masse volumique du matériau obtenu et sa conductivité thermique sont similaires pour les trois terres étudiées. Les graphes ci-dessous peuvent servir de guides pour la formulation de bétons de terre-chanvre.

↓ **Des mesures de masse volumique sèche et de conductivité ont été effectuées sur des éprouvettes de terre-chanvre pour différents dosages de chènevotte. Ces graphes peuvent servir de guide pour la formulation de matériaux : pour obtenir un matériau de conductivité thermique 0,2 W/m.K, la densité doit être de 700 kg/m³, ce qui correspond à une proportion pondérale de 11 % de chènevotte.**




Le comportement mécanique des bétons de chanvre est déterminé en grande partie par deux paramètres : la qualité du liant argileux (importance du choix de la terre) et la masse volumique finale du matériau.

La proportion de chènevotte dans le matériau impacte directement la masse volumique et donc le comportement mécanique : moins il y a de liant, plus la résistance mécanique est faible et la déformabilité élevée.

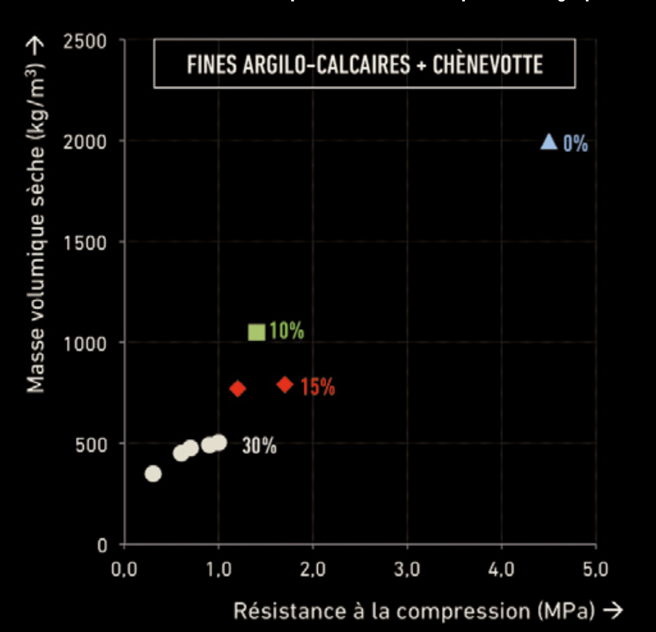
Pour un dosage fixe de chènevotte, la masse volumique peut varier en fonction des paramètres de mise en œuvre : énergie de compaction, épaisseur des couches. Ces étapes doivent donc être maîtrisées pour obtenir le résultat souhaité.

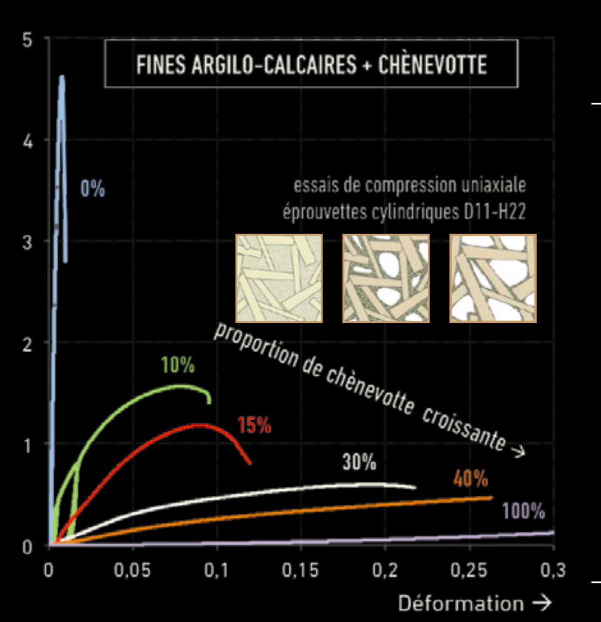




Crédit (s) BAE-Lionel Ronsoux/ENTPE

↓↗ **Les essais de compression sur des bétons terre-chanvre montrent que la résistance et la déformabilité dépendent de la densité et donc de la teneur en chènevotte du matériau (exprimée en % massique sur les graphes).**



## RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

# Des matériaux qui stockent l'humidité



Les isothermes d'adsorption de vapeur d'eau ont été mesurés à température ambiante pour différents composites terre-chènevotte. La chènevotte seule a une capacité d'adsorption d'eau très importante, ce qui se traduit par des teneurs en eau bien plus élevées dans les composites que dans la terre non fibrée.

Les isothermes d'adsorption des composites peuvent être prédits à partir des isothermes des constituants seuls par une simple loi des mélanges : $M_{eau} = w_{chanvre} \times M_{chanvre} + w_{terre} \times M_{terre}$

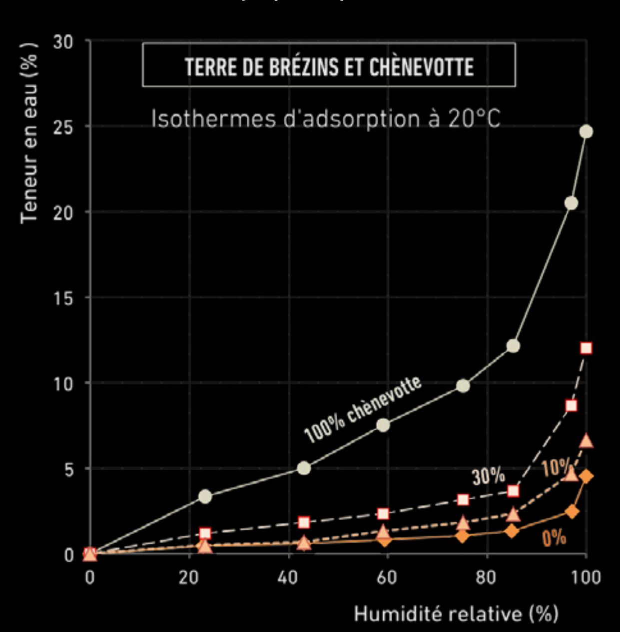
où $M_i$ est la masse du constituant i et $w_i$ la teneur en eau massique dans le constituant i pour une humidité relative donnée.

Les bétons de terre-chanvre ont donc des capacités d'adsorption de vapeur d'eau intéressantes, que la formulation du matériau permet d'ajuster au besoin. Les changements de phase de l'eau au sein de ces matériaux ont une influence sur l'inertie thermique bien plus marquée que dans la terre crue.

Ces bétons de terre-chanvre peuvent également réguler l'humidité ambiante dans une pièce. Cela n'est valable qu'à condition de ne pas boucher les pores par un revêtement de surface étanche.

**→ De nombreux échantillons de matériaux ont été placés dans des enceintes fermées avec une humidité relative contrôlée, à 20°C, pour tracer leurs isothermes d'adsorption de vapeur d'eau. Les matériaux caractérisés sont des morceaux de bétons de terre-chanvre, de terre coulée ou compactée et de la chènevotte seule.**

**Chaque point de cette courbe correspond à plusieurs semaines de conditionnement, jusqu'à ce que la masse soit stable. ↓**






Crédit (s) : BAE-Lionel Ronsoux/ENTPE

## NOUVEAU PRODUIT

# Des blocs régulateurs hygrothermiques à base de déchets de carrière



Crédit (s) : BAE-Les Grands Ateliers

↑ Ces blocs de terre-chanvre (dimensions : 50/30/20 cm) peuvent être utilisés comme éléments porteurs tout en contribuant à l'isolation et l'inertie thermique d'un bâtiment.

Les recherches sur les composites terre-chanvre ont abouti à la création d'une série de blocs pour la construction réalisés avec des dosages de l'ordre de 10 % de chanvre pour 90 % de fines argilo-calcaires.

Ce matériau a des caractéristiques intéressantes avec une résistance à la compression de 1,7 MPa, une conductivité thermique de 0,32 W/m.K et une capacité d'adsorption environ 2 fois plus importante que celle de la terre seule.

Ces blocs ont des dimensions qui s'adaptent à l'usage recherché :

- le mégabloc, cousin des grosses bottes de pailles ou des pierres du Gard sorties brutes de carrière, peut être utilisé comme élément porteur ;
- les briques peuvent être utilisées comme des hourdis sur plancher bois.

Le matériau mis au point ouvre une voie intéressante de valorisation des fines argilo-calcaires, actuellement considérées comme un déchet encombrant pour les carrières de granulats.



## NOUVEAU PRODUIT

# Des panneaux correcteurs hygrothermiques à base de déchets de carrière



Les mélanges de terre et chanvre permettent de fabriquer des panneaux de 15 mm d'épaisseur pour des usages équivalents à ceux des plaques de plâtre : cloisons intérieures, revêtements de murs massifs, plafonds.

Les caractéristiques de ces panneaux sont ajustables grâce au choix du dosage en chanvre :

- pour des panneaux légers contenant 30 à 40 % de chanvre, la conductivité thermique est de l'ordre de 0,1 W/m.K et la capacité d'adsorption 3 à 4 fois supérieure à celle de la terre seule ;
- pour des panneaux plus denses contenant jusqu'à 10 % de chanvre, la conductivité thermique est de l'ordre de 0,3 W/m.K et la capacité d'adsorption 2 fois supérieure à celle de la terre seule.

Ces panneaux pourraient être également de bons correcteurs acoustiques et mériteraient d'être caractérisés dans ce sens.



Crédit (s) : BAE-Les Grands Ateliers

↑ Ces panneaux de terre-chanvre (dimensions : 60/60/2,5 cm) peuvent être utilisés comme éléments de cloisons ou de revêtements. Ils apportent une correction thermique et permettent de réguler l'humidité d'une pièce.

# 4

# BÉTONS D'ARGILE COULABLES

Le béton, dans lequel les graviers et les sables sont agglomérés par le ciment, présente des analogies essentielles avec la terre, dans laquelle les cailloux, les graviers et les sables sont agglomérés par les argiles. La terre est un béton d'argile.

Il en découle que la plupart des innovations majeures qui, au cours des trente dernières années, ont mené à la mise au point des spectaculaires bétons UHP (ultra hautes performances) sont directement transférables au matériau terre.



Crédit (s) : Mathieu Neuville

# Empilements granulaires …



La terre est constituée d'un empilement de grains de différentes tailles, dont les plus petits sont les argiles. Ces particules fines constituent le ciment de la terre. Les proportions des différentes tailles de grains varient d'une terre à l'autre : certaines sont dites sableuses car riches en grains de quelques millimètres, d'autres sont caillouteuses, d'autres encore sont silteuses ou argileuses car particulièrement riches en particules fines et collantes. Ces grains donnent à chaque terre des comportements spécifiques.

Les producteurs de bétons de ciment ont acquis une grande maîtrise des empilements granulaires. Ils ont compris depuis longtemps que des empilements compacts, qui laissent très peu de vides entre les grains, permettent d'obtenir de grandes résistances mécaniques. Ils connaissent également l'influence des empilements sur la rhéologie des bétons, leur capacité à s'étaler facilement avec une quantité d'eau limitée.

Ces connaissances sont directement transférables aux bétons d'argile formulés à partir de terres naturelles. Il est possible de modifier l'empilement granulaire d'une terre en ajoutant des grains de tailles bien choisies, ou en retirant des grains par tamisage. Ces adaptations permettent de formuler des bétons d'argile compacts, résistants ou fluides selon les besoins.

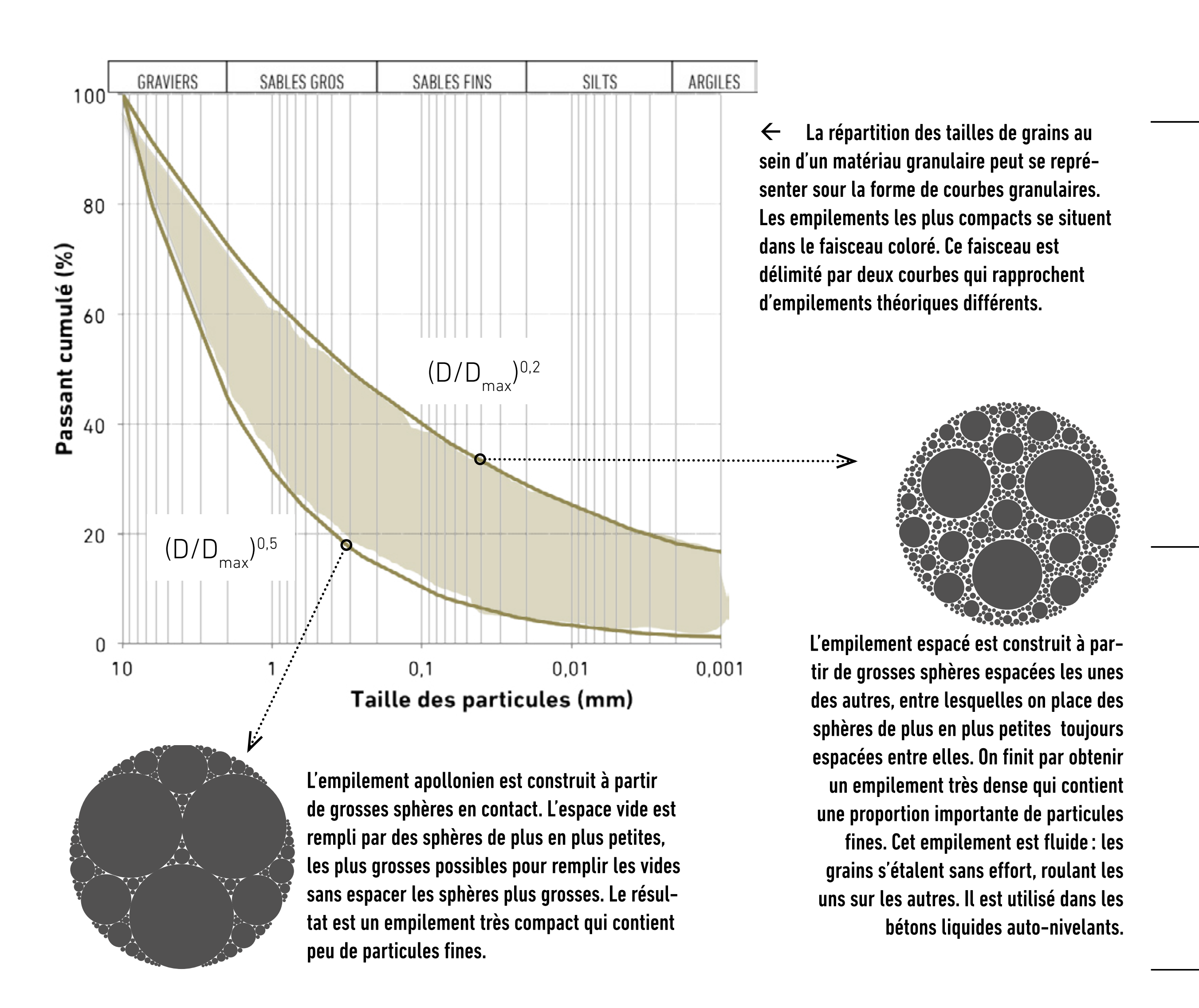
Dans la formulation d'un béton d'argile à partir d'une terre naturelle, la difficulté réside dans le fait que le liant argileux n'est pas dissocié du squelette granulaire initial. Cela constitue une différence importante par rapport à la démarche de formulation des bétons de ciment où la proportion de chaque constituant peut être ajustée de manière indépendante.

Pour transformer une terre en béton coulable par exemple, il peut être nécessaire d'ajouter des grains de tailles bien choisies pour optimiser l'empilement granulaire du matériau. Cela a pour conséquence de diminuer la proportion d'argiles dans le matériau, ce qui peut diminuer le retrait et le risque de fissuration du matériau, mais aussi nuire à la résistance mécanique. Il y a un compromis à trouver. L'inverse se produit si l'on tamise la terre pour retirer certaines tailles de grains : le matériau comporte finalement une proportion d'argiles plus importante après cette opération.



# … compacts et fluides !






← **La répartition des tailles de grains au sein d'un matériau granulaire peut se représenter sour la forme de courbes granulaires. Les empilements les plus compacts se situent dans le faisceau coloré. Ce faisceau est délimité par deux courbes qui rapprochent d'empilements théoriques différents.**

**L'empilement espacé est construit à partir de grosses sphères espacées les unes des autres, entre lesquelles on place des sphères de plus en plus petites toujours espacées entre elles. On finit par obtenir un empilement très dense qui contient une proportion importante de particules fines. Cet empilement est fluide : les grains s'étalent sans effort, roulant les uns sur les autres. Il est utilisé dans les bétons liquides auto-nivelants.**

**L'empilement apollonien est construit à partir de grosses sphères en contact. L'espace vide est rempli par des sphères de plus en plus petites, les plus grosses possibles pour remplir les vides sans espacer les sphères plus grosses. Le résultat est un empilement très compact qui contient peu de particules fines.**

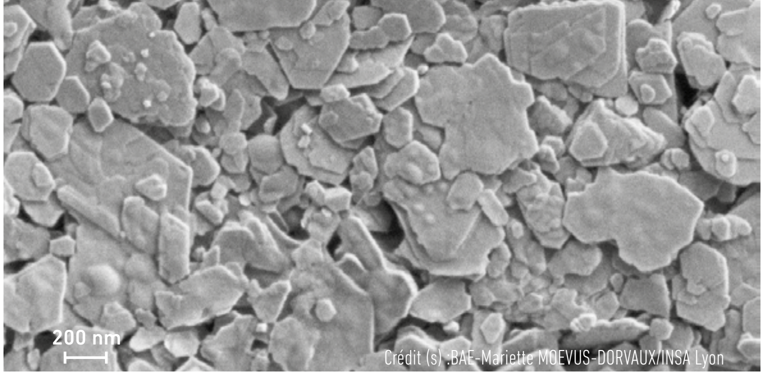
# Disperser les argiles ...



Le liant de la terre est constitué principalement d'argiles. Ce sont des phyllosilicates constitués à l'échelle nanométrique de feuillets de silicates, empilés de façon à former des plaquettes (le plus souvent) ou d'autres formes de particules à l'échelle microscopique.

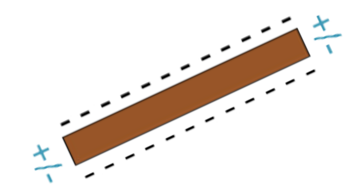
Les plaquettes d'argile portent des charges négatives permanentes sur leurs faces, et des charges variables en fonction du pH sur les bords. Les plaquettes peuvent donc s'attirer ou se repousser suivant les conditions du milieu, s'agréger de manière plus ou moins compacte, ce qui se traduit par une fluidité plus ou moins grande de la boue à l'échelle macroscopique.

Pour obtenir une grande fluidité avec un minimum d'eau, l'idéal est la configuration dispersée, où les plaquettes d'argile peuvent se mouvoir de manière indépendante les unes des autres. Plusieurs solutions permettent d'atteindre cet état.

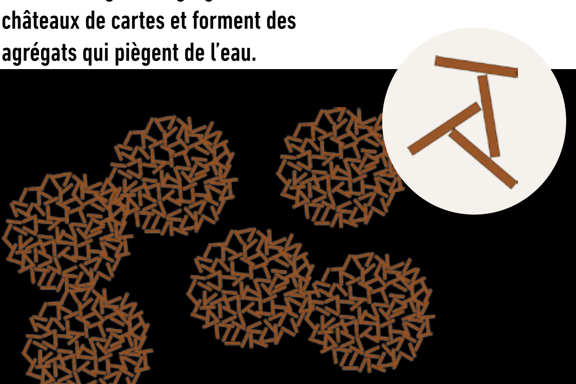



**↑ Les argiles se présentent souvent sous forme de plaquettes microscopiques de dimensions variables, comme cette kaolinite.**

**↓ Une plaquette d'argile porte des charges négatives permanentes sur les faces et des charges variables en fonction du pH sur les bords.**




**↓ Les argiles s'agrègent en châteaux de cartes et forment des agrégats qui piègent de l'eau.**



**↓ Les argiles sont dispersées et toute l'eau est disponible pour fluidifier.**

# ... avec des molécules organiques





Dispersants, réducteurs d'eau et superplastifiants sont des produits bien connus de l'industrie céramique et de l'industrie cimentière. Tous ces produits sont des molécules organiques développées pour disperser des particules fines en milieu aqueux.

Leurs modes d'action, souvent complexes, peuvent être classés en trois grandes catégories :

- répulsion électrostatique (fixation de charges électrostatiques sur les particules à disperser)
- répulsion stérique (encombrement des molécules organiques adsorbées sur les particules)
- répulsion électrostérique (combinaison des deux mécanismes).

L'utilisation de dispersants pour la construction en terre pourrait permettre de gagner du temps lors de la mise en œuvre et faciliter le travail du maçon. Une bonne compréhension des mécanismes mis en jeu avec des molécules dont la composition est bien maîtrisée facilitera l'identification de dispersants naturels efficaces.

**↓ À gauche, une boue de terre de Brézins. À droite, la même boue à la même teneur en eau, à laquelle on a ajouté un dispersant organique. La boue est beaucoup plus fluide.**





**RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX**

# Un effet spectaculaire sur l'écoulement des boues

L'effet de plusieurs dispersants sur l'écoulement de boues d'argile a été mesuré. Sans dispersant, ces boues présentent un seuil d'écoulement, c'est-à-dire qu'il faut dépasser une certaine contrainte pour mettre en mouvement la matière.

L'ajout d'un dispersant en quantité très faible (ici 0,2% d'hexamétaphosphate de sodium, ou HMP) permet de diminuer la viscosité de la suspension à des valeurs très faibles et d'annuler le seuil d'écoulement. Il n'y a plus de résistance pour mettre en mouvement la matière qui devient fluide comme de l'eau. Des essais d'étalement de mortiers à différents dosages de dispersants ont été réalisés de manière à mettre en évidence l'effet fluidifiant dans des conditions plus représentatives de l'échelle du terrain. L'utilisation de dispersants conduit à une forte augmentation de l'étalement des mortiers. Mais il faut deux fois plus de dispersant pour fluidifier un mortier contenant des silts et des sables que pour fluidifier une boue.

La même efficacité est obtenue avec des dispersants différents : l'hexamétaphosphate de sodium (HMP) qui provoque une répulsion électrostatique, l'acide polyacrylique de sodium qui fonctionne par encombrement stérique, et le Darvan7S qui combine l'effet électrostatique et stérique.
Il est remarquable de constater que les dispersants utilisés sont efficaces pour les trois terres naturelles étudiées, malgré des compositions très différentes en argile et autres impuretés de type ferrique : illite et kaolinite pour les fines argilo-calcaires, kaolinite pour la terre rouge, et illite et muscovite pour la terre à pisé.

D'un point de vue pratique, cela indique que l'usage d'un dispersant sur ces matériaux est robuste.



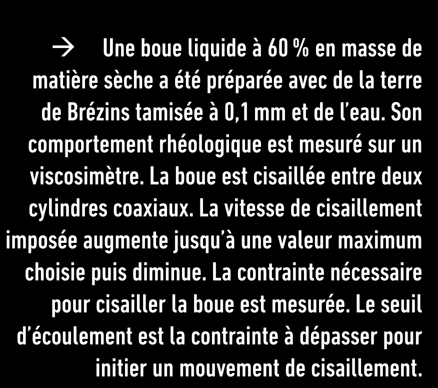
↑ Mortier de terre de Brézins : l'étalement est quasi nul.

Crédit (s) : Lucile Couvreur / amàco

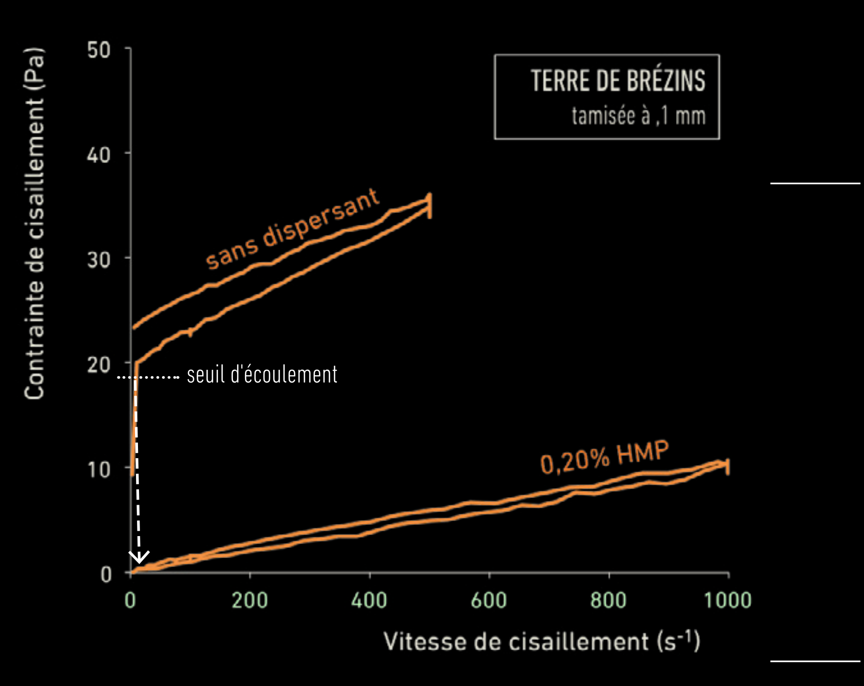


↑ Mortier de terre de Brézins à la même teneur en eau avec ajout de dispersant HMP : le mortier s'écoule, l'étalement est très important.





→ Une boue liquide à 60 % en masse de matière sèche a été préparée avec de la terre de Brézins tamisée à 0,1 mm et de l'eau. Son comportement rhéologique est mesuré sur un viscosimètre. La boue est cisaillée entre deux cylindres coaxiaux. La vitesse de cisaillement imposée augmente jusqu'à une valeur maximum choisie puis diminue. La contrainte nécessaire pour cisailler la boue est mesurée. Le seuil d'écoulement est la contrainte à dépasser pour initier un mouvement de cisaillement.



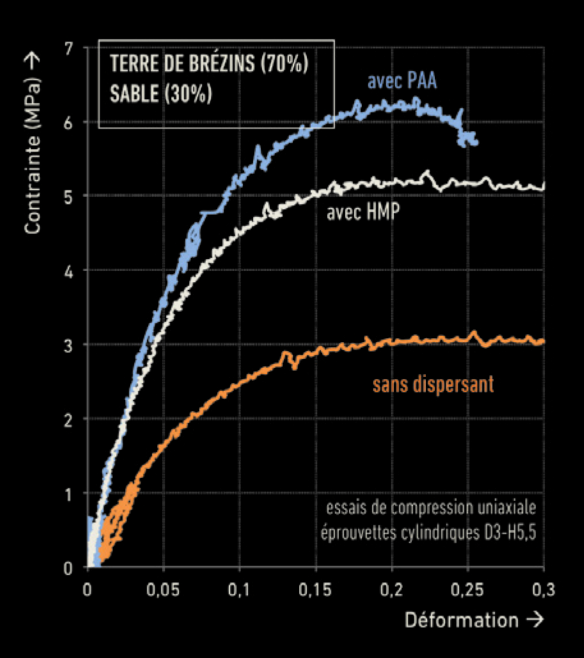
## RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

# La dispersion améliore la résistance mécanique …

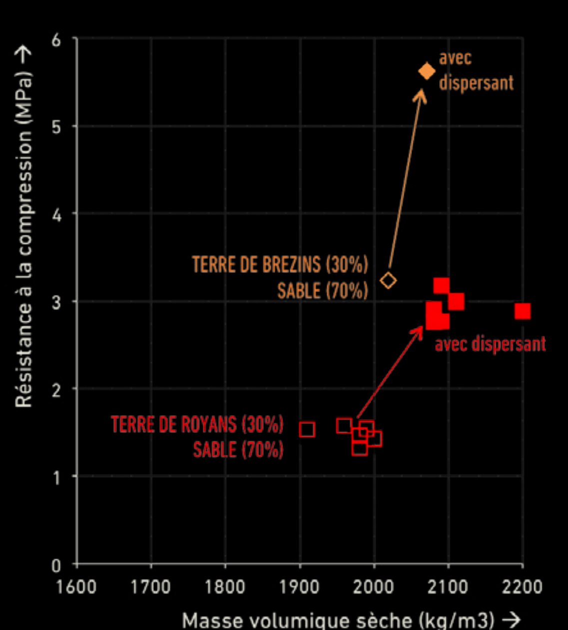


L'utilisation d'un dispersant permet d'introduire moins d'eau dans le béton lors de sa mise en œuvre, tout en ayant une bonne fluidité. Cela se traduit par un gain de densité finale plus ou moins marqué. Dans le cas de mortiers préparés avec de la terre rouge tamisée à 0,1 mm (30 %) et du sable (70 %), la masse volumique sèche augmente de 6 %. Dans le cas de la terre de Brézins tamisée à 0,1 mm (30 %) mélangée à du sable (70 %), le gain de masse volumique est de 2,5 %.

Les essais réalisés montrent que la dispersion de la terre à la mise en œuvre peut se traduire par une forte augmentation de résistance. Ce gain de résistance dépend de la proportion de liant dans le matériau : plus elle est élevée, plus l'effet d'un dispersant sur la fluidité à la mise en œuvre et sur le comportement mécanique est marqué.




↑ Les courbes de comportement en compression uniaxiale ont été mesurées pour des éprouvettes de terre tamisée à 0,1 mm mélangée à du sable, avec et sans dispersant (HMP : hexamétaphosphate de sodium, PAA : acide polyacrylique).




↑ Chaque point correspond à une éprouvette dont on a mesuré la masse voumique et la résistance à la compression. L'ajout d'un dispersant augmente la masse volumique et la résistance mécanique.



## RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

# … en réduisant la porosité fine



Le gain de résistance ne découle pas uniquement de l'augmentation de densité du matériau. La dispersion lors de la mise en œuvre a des conséquences sur l'organisation des argiles entre elles, donc sur la microstructure à l'état sec. La dispersion déstructure les agrégats formés par les argiles et permet aux plaquettes de s'empiler faces contre faces. La cohésion du liant argileux en est renforcée.

Des analyses de la microstructure par porosimétrie mercure, réalisées en marge du projet, ont permis de conforter cette hypothèse. Elles ont mis en évidence une modification du réseau poreux dans le cas où les argiles sont dispersées au moment de la mise en œuvre.




Suspension de kaolinite sans dispersant après séchage

Crédit (s) : BAE-Mariette MOEVUS-DORVAUX/INSA Lyon




Suspension de kaolinite avec dispersant après séchage

→ Ces deux images obtenues en microscopie électonique à balayage montrent la surface d'une goutte d'argile (de la kaolinite). En haut, sans dispersant, les plaquettes forment des paquets et sont arrangées de manière irrégulière. En bas, avec du dispersant, les plaquettes s'arrangent face contre face de manière très régulière, et la surface est plus lisse.

Source : Moevus, M., Jorand, Y., Maximilien, S., Olagnon, C., Anger, R., Fontaine, L., Arnaud, L. (2015). Earthen construction: an increase of the mechanical strength by optimizing the dispersion of the binder phase. Materials and structures.

## TRANSFERT ECHELLE 1

# Une dalle coulée à la même teneur en eau qu'un pisé !



Un béton d'argile fluide a été formulé pour le coulage d'une dalle de démonstration lors du Festival Grains d'Isère 2012.

Ce béton a été formulé à partir de la terre de Brézins et sans ciment, en travaillant sur l'empilement granulaire et sur la dispersion des argiles. Des essais préliminaires ont permis de déterminer le squelette granulaire optimal et le dispersant adapté pour obtenir une grande fluidité avec un minimum d'eau.

L'objectif a été atteint avec une consistance fluide pour seulement 10 % d'eau!

Pour comparaison, la teneur en eau d'un mur en pisé classique est de 8 à12 % pour une consistance humide.
La terre de Brézins brute 0-10 mm livrée en big bag avait une teneur en eau de 15 % et formait des mottes très collantes. Le résultat obtenu avec 10 % d'eau est donc remarquable.

La formule mise au point lors de cette première expérimentation à l'échelle 1 est à parfaire pour réduire la sensibilité à la fissuration au séchage.




↑ Des essais préliminaires de retrait / fissuration ont permis de mettre au point la formulation du béton d'argile fluide pour la réalisation d'une dalle coulée.

→ Une dalle en béton d'argile fluide a été coulée aux Grands Ateliers lors du festival Grains d'Isère 2012. Grâce au travail de formulation sur les empilements granulaires et la dispersion du liant, la quantité d'eau de mise en œuvre est de seulement 10 %, ce qui est équivalent à la quantité d'eau nécessaire à la mise en œuvre du pisé à l'état humide.

Crédit (s) : BAE-Mariette MOEVUS-DORVAUX/Les Grands Ateliers

## NOUVEAU PRODUIT

# Un béton d'argile coulable à base de fines argilo-calcaires



Dans le cadre du chantier du musée des Marais de St Omer (Pas de Calais), un béton d'argile à base de fines argilo-calcaires a été mis au point pour réaliser des modules d'exposition. Ce projet a été l'occasion d'appliquer les résultats obtenus en laboratoire à un cas concret et de valoriser les fines issues des boues de lavage de granulats, une ressource abondante inutilisée.

La demande initiale de la maîtrise d'œuvre était de réaliser ces modules d'exposition en pisé afin d'obtenir un effet de strates proches des coupes géologiques. Les modules à réaliser sont non-porteurs, mais ils contiennent des aquariums, des maquettes, des écrans, etc. La difficulté de réaliser de tels éléments en pisé a poussé l'entreprise Caracol à proposer la technique du béton d'argile, qui, coulé, permet de s'adapter facilement à la forme des moules et coffrages. Le travail de formulation a été mené par les partenaires industriels du projet BAE en collaboration avec les chercheurs.

Le cahier des charges était le suivant :
• Une fluidité importante : classe d'affaissement S4 au départ de la centrale avec un affaissement au cône d'Abrahms visé de 180 mm,
• Maintien de la fluidité pendant environ 1h30 permettant de transporter le béton de la centrale au chantier et de le transférer aux coffrages à l'aide d'une pompe,
• Résistance à la compression ≈ 1,5 MPa.

Le béton d'argile a été formulé à partir de matériaux fournis par les Carrières du Boulonnais. L'utilisation de différents types de sables (marins, calcaires) permet d'optimiser le squelette granulaire du matériau et ses performances mécaniques. Le liant est constitué des fines argilo-calcaires et d'un faible pourcentage de ciment (4,5 %) pour permettre un durcissement suffisant pour décoffrer rapidement. Un superplastifiant a été utilisé pour disperser les argiles et ainsi limiter la quantité d'eau lors de la mise en œuvre. La formulation, spécifique aux matières premières utilisées, est la suivante : 90 kg/m$^3$ de ciment, 225 kg/m$^3$ de fines argilo-calcaires, 878 kg/m$^3$ de sable, 864 kg/m$^3$ de graviers, 4.5 kg/m$^3$ de superplastifiant et 217 kg/m$^3$ d'eau.
Un premier prototype réalisé pendant le festival Grains d'Isère 2012 a permis de tester à l'échelle 1 la première formulation mise au point et de faire des essais de textures et de couleurs.

Un deuxième prototype réalisé l'année suivante a permis de confirmer la formulation définitive, avec une mise en œuvre proche de la réalité. Sa taille plus importante (2 m/2 m/0.8 m) a permis de valider, après séchage complet le très faible retrait de ce produit. L'effet de strates définitif a été accepté par la maitrise d'œuvre et d'ouvrage suite à une visite sur place.



Ce mur prototype a permis de valider la formulation du béton d'argile à base de fines argilo-calcaire pour la Maison des Marais (St Omer), les techniques de coffrage et de mise en œuvre, ainsi que les effets de couleurs et de textures.

Crédit (s) : BAE-Martin Pointet/Caracol

**CHANTIER PILOTE**

# Réalisation de modules d'exposition dans la Maison des Marais de St Omer

Ce nouveau béton d'argile fluide à base de fines argilo-calcaires a été mis en œuvre en octobre 2013 sur le chantier de la Maison des Marais à St Omer (Pas-de-Calais). Environ 60 m³ de béton d'argile ont été produits en centrale à béton, transportés en camion toupie, déversés dans des coffrages et vibrés, de la même manière qu'un béton de ciment. C'est une première en France, pour un béton à base de terre.

Crédit (s) : Jaques Berthier



Crédit (s) : BAE-Caracol



Crédit (s) : BAE-Caracol



Crédit (s) : BAE-Caracol




Crédit (s) : BAE-Caracol



Crédit (s) : BAE-Caracol



Crédit (s) : BAE-Caracol

# 5

# PERSPECTIVES D'INNOVATIONS

En marge des résultats présentés, plusieurs pistes d'innovations ont été ouvertes dans le cadre du projet Béton d'Argile Environnemental, avec des expérimentations qui ont abouti à des résultats prometteurs. Ces explorations ouvrent la voie à de futurs travaux de recherche pour le développement de bétons d'argile à faible impact environnemental et à forte valeur ajoutée.



Crédit (s) : Carsten Niehaus / wikipédia : caroubier

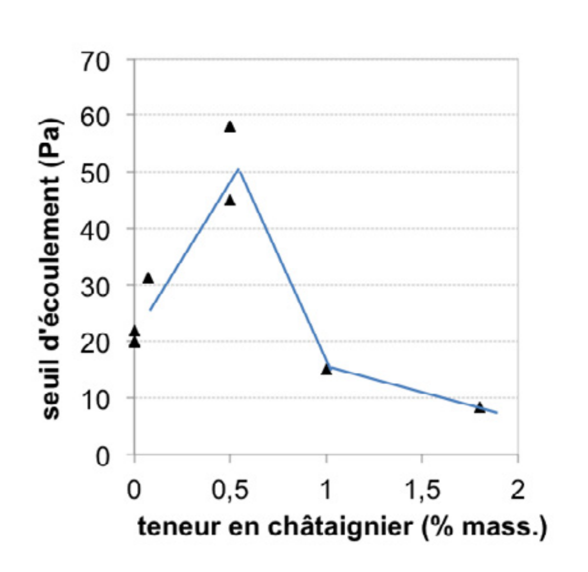
# Des dispersants naturels pour fluidifier la terre

La dispersion des argiles apporte des avantages significatifs pour la mise en œuvre de bétons d'argile et pour leurs propriétés finales. Actuellement les meilleurs résultats sont obtenus avec des produits dispersants industriels dont l'impact environnemental et la toxicité ne sont sans doute pas négligeables. Pourtant l'un des gros atouts de la terre crue, telle qu'elle est utilisée dans les cultures constructives ancestrales, est d'être réutilisable à l'infini et de générer très peu d'impacts sur l'environnement. Introduire des produits potentiellement toxiques dans la terre remet en question la possibilité de la réutiliser en tant que sol.

L'affinité de la terre avec les matières organiques naturelles est par ailleurs connue depuis toujours. Des recettes incluant des stabilisants naturels dans la terre à construire, comme le sang, l'urine, la caséine, ou la bouse de vache, ont été développées pendant des siècles dans différentes traditions.

Certaines molécules biopolymères peuvent agir comme des dispersants des argiles. C'est le cas par exemple de l'acide humique qui peut disperser des particules de montmorillonite (une argile gonflante), ou de la caséine que l'on peut utiliser comme dispersant du ciment.

Certains tanins peuvent aussi jouer ce rôle. Ce sont des molécules polyphénoliques qui portent une charge négative dépendante du pH. La chimie des tanins est complexe. Il s'agit d'une famille très diversifiée de molécules issues des végétaux qu'il est difficile d'obtenir sous une forme pure.




← Des suspensions à 60 % de matière sèche de terre de Brézins tamisée à 0,1 mm ont été caractérisées pour différents dosages de tanin de châtaignier. Les mesures sont faites dans un viscosimètre à cylindres coaxiaux. Plus le seuil d'écoulement est faible, plus la suspension est fluide. Un seuil d'écoulement supérieur à 0 indique que la suspension n'est pas dans un état dispersé. Les résultats montrent ici que l'effet du tanin et très sensible au dosage. Il faut un dosage supérieur à 1 % pour observer une fluidification, qui n'est cependant pas optimale.



← Le bois de châtaignier contient des tanins. Crédit (s) : Dinkum





Une campagne d'essais exploratoire a été menée avec différents naturels pour tester leur caractère fluidifiant sur des boues d'argile.
Des mesures rhéologiques ont été réalisées sur des suspensions de terres naturelles dans lesquelles différents tanins ont été introduits. La dispersion la plus efficace est obtenue avec le tanin de châtaignier, puis le quebracho, la valonée et le myrobolam, pour la teneur choisie de 1,7 % en masse. Il est possible que cette teneur ne soit pas optimale pour tous ces tanins.

L'effet fluidifiant recherché avec le tanin de châtaignier n'est obtenu que pour certains dosages et certaines conditions de pH. Son efficacité est optimale à pH 9,5 avec un dosage de 1,7 % en masse. Dans ces conditions, le tanin semble aussi efficace que les dispersants industriels.

Cependant l'effet du tanin est très sensible au dosage et au pH. À très faible dose, il a l'effet inverse à celui recherché : il épaissit la boue d'argile.

Des essais d'étalement ont été faits sur des mortiers de terre tamisée à 0,1 mm (30 %) et sable normalisé (70 %). Il n'a pas été observé d'effet fluidifiant avec le tanin de châtaignier, même avec des ajouts de soude pour augmenter le pH.

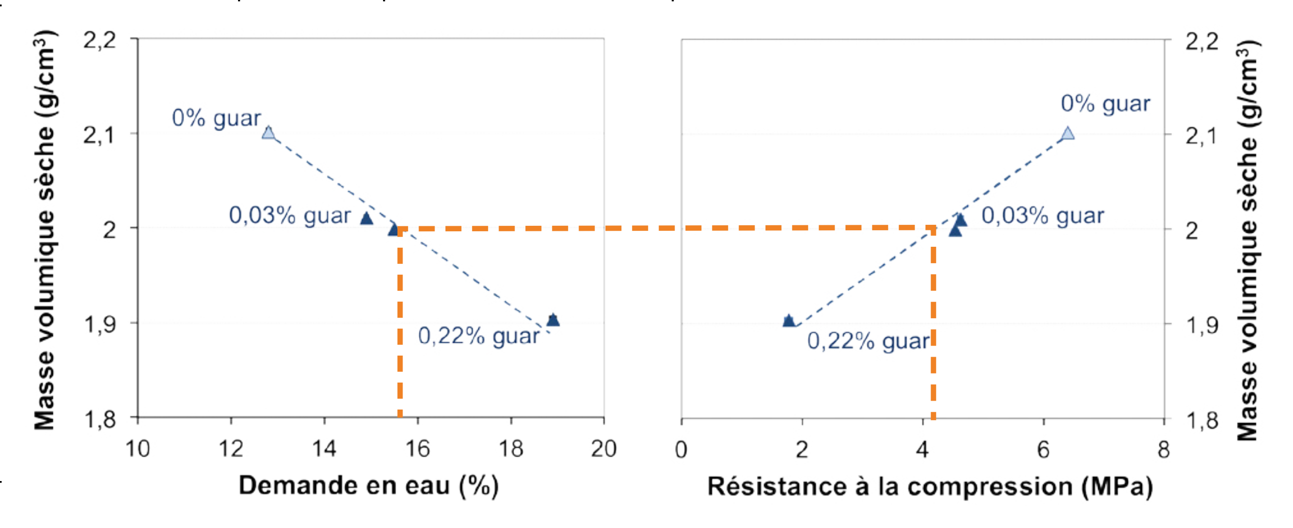
Les mécanismes physico-chimiques mis en jeu dans ces expériences ne sont pas maîtrisés. Il est nécessaire de mieux comprendre les interactions entre tanins et argiles pour envisager l'utilisation de tanins dans des bétons d'argile.

# Des biopolymères pour renforcer la cohésion

Au fil des siècles, les bâtisseurs utilisant la terre crue ont développé des recettes qui incluent bien souvent des produits organiques naturels : bouse de vache, tanins, caséine, algues, etc. Ces biopolymères issus du vivant améliorent certaines propriétés comme la résistance à l'érosion, à la compression ou encore la texture à la mise en œuvre. Ces effets n'ont fait l'objet que de très peu de recherche et restent à comprendre.

Dans le domaine de la recherche sur les matériaux, les très grandes performances mécaniques des nano-composites argiles / polymères, qui utilisent des argiles exfoliées comme charge minérale dans une matrice plastique, invitent à revisiter les techniques traditionnelles de stabilisation de la terre par des adjuvants organiques, en accordant plus d'importance à la qualité de la dispersion des argiles et du biopolymère lors du mélange.

↓ Des mortiers fins (taille de grains maximale 2 mm) de terre à pisé ont été mis en oeuvre avec et sans gomme de guar, à consistance fixe, et caractérisés après séchage. La demande en eau à la mise en oeuvre augmente avec la quantité de gélifiant, ce qui se traduit par une diminution de la masse volumique sèche du composite et de sa résistance à la compression.







← La caroube est un produit gélifiant de la famille des galactomannanes





Des recherches exploratoires ont été menées dans le cadre du projet BAE dans le but d'augmenter la cohésion du liant argileux par association de biopolymères naturels. L'étude est centrée sur deux adjuvants: la caroube et la gomme de guar, des produits gélifiants de la famille des galactomannanes.

La méthodologie suivante a été appliquée :
- dissolution optimale des biopolymères
- dispersion optimale du liant argileux
- caractérisation rhéologique du mélange argile / biopolymère à différents dosages
- caractérisation mécanique des composites argile / biopolymère à différents dosages

L'étude de l'écoulement des boues montre que l'ajout de caroube ou de gomme de guar a pour effet de diminuer la fluidité, et que cet effet gélifiant est proportionnel à la quantité de biopolymère ajouté. Les dispersants utilisés (acide polyacrylique PAA et hexamétaphosphate de sodium HMP) permettent de diminuer l'effet gélifiant, sans pour autant l'annuler.

Les composites terre / caroube ou gomme de guar ont été mis en œuvre en travaillant à consistance fixe pour se rapprocher des conditions de terrain : on a besoin sur un chantier d'ajuster la teneur en eau des matériaux pour que leur consistance soit adaptée à la technique de mise en œuvre utilisée. Une fois secs, leurs propriétés mécaniques ont été mesurées : résistance à la compression, raideur, dureté de surface.

Les biopolymères choisis ici font augmenter la demande en eau, ce qui conduit à diminuer la masse volumique sèche des composites. Or les propriétés mécaniques mesurées dépendent directement de la masse volumique : plus elle est faible, plus les propriétés mécaniques sont faibles. Ainsi, en travaillant à consistance fixe, l'utilisation des galactomannanes diminue la cohésion de la terre.

Il est probable que les protocoles d'élaboration choisis, relativement simples, ne permettent pas une interaction optimale entre les argiles et les galactomannanes. Une étude physico-chimique approfondie permettrait de mieux comprendre et favoriser ces interactions, en vue d'obtenir une amélioration des propriétés mécaniques de ces composites.

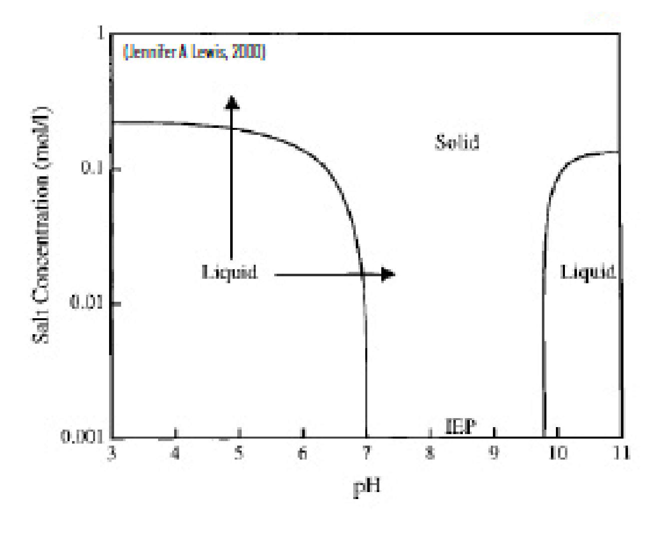
# Coagulation des bétons d'argile



Le point fort des bétons de ciment réside dans leur rapidité de mise en œuvre. Grâce au durcissement induit par la prise hydraulique du ciment, les coffrages ayant servi au coulage peuvent être ôtées sous 24 h.
En revanche, la terre coulée ne peut durcir qu'en séchant, une opération extrêmement longue dans des coffrages à béton. Aujourd'hui, la stabilisation par un liant hydraulique (chaux, ciment…) est donc indispensable à la réalisation d'ouvrages en béton d'argile. Bien que conservant l'intérêt d'un matériau pouvant être en partie extrait sur place, cette technique diminue beaucoup l'intérêt écologique du matériau terre.

En effet, la production de ciment est aujourd'hui responsable de 2 % des émissions de gaz à effet de serre à l'échelle mondiale. De plus, même introduit en faible proportion (3 à 8 %), le liant hydraulique fait perdre au matériau terre sa réversibilité : il ne pourra plus être remis en œuvre par simple ajout d'eau, ce qui pénalise le cycle de vie de la terre crue.
D'autres solutions doivent donc être envisagées pour formuler des bétons d'argile auto-durcissants.

→ Afin de réaliser des bétons d'argile auto-ducissants sans ciment, l'ajout d'un agent coagulant ayant une action différée dans le temps pourrait être envisagée.







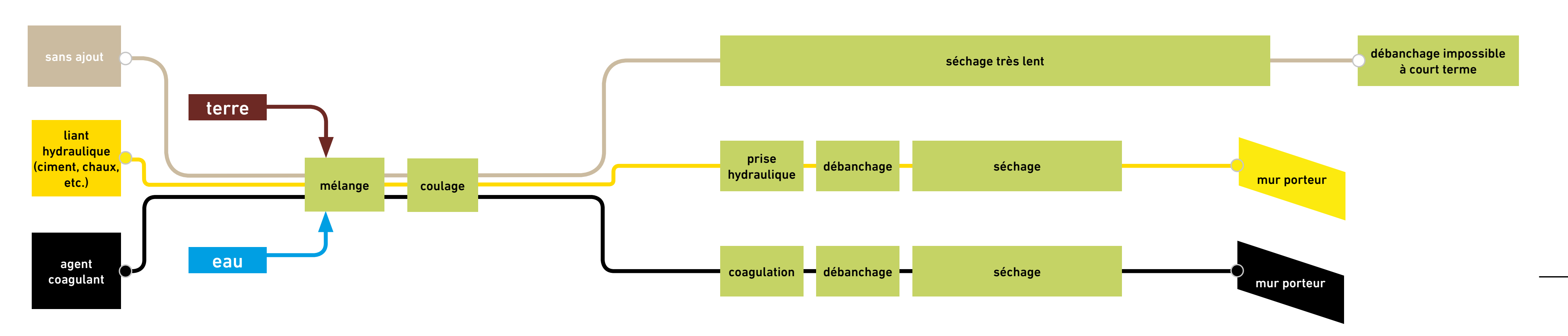
↑ La technique de Direct Coagulation Casting utilisée dans le domaine des céramiques techniques permet de durcir une barbotine liquide de manière différée dans le temps.

← Il est possible de cartographier les zones de transition liquide-solide d'une suspension d'alumine en fonction du pH et de la force ionique.





L'industrie céramique utilise des techniques qui permettent de coaguler les particules dispersées d'une barbotine pour la transformer en pâte dure rapidement démoulable. La technique de Direct Coagulation Casting, par exemple, utilise une réaction enzymatique qui permet de modifier le pH ou la force ionique (teneur en sel du milieu) et de provoquer la floculation des particules. Cette réaction est différée dans le temps de manière à ce que la barbotine reste fluide pendant la mise en œuvre.
Un transfert de cette technologie au domaine des bétons d'argile permettrait d'obtenir un béton auto-durcissant, décoffrable aussi rapidement qu'un béton ciment. Une fois le mortier coagulé, les coffrages pourraient être ôtés, permettant une évaporation optimale, et donc un séchage accéléré.



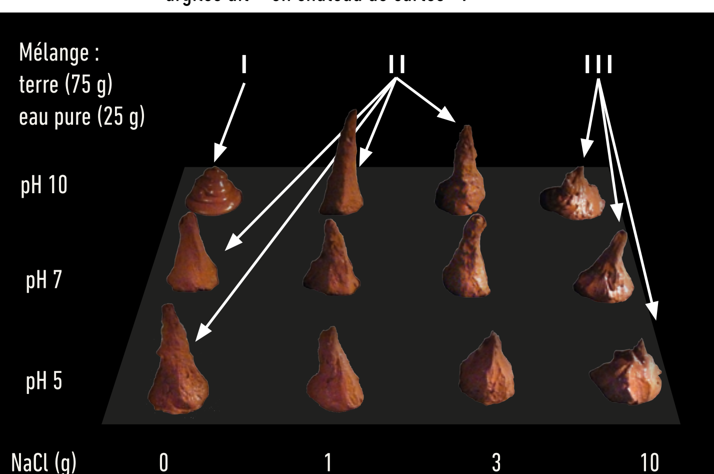
# Coagulation des bétons d'argile

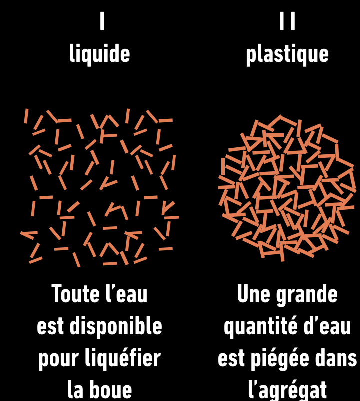


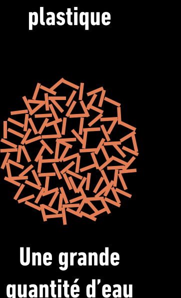
D'un point de vue physique, la coagulation se traduit par une augmentation de la viscosité, que l'on évalue par la résistance au cisaillement du mortier. Des calculs simples tenant compte de la masse volumique du mélange terre-eau montrent que la contrainte de cisaillement minimale à atteindre pour qu'un mur de 1 m de haut puisse être décoffré est d'environ 0,5 MPa.

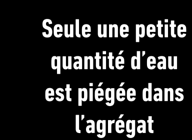
Comme expliqué précédemment (p.62), suivant les conditions du milieu, le liant argileux peut se trouver dans une configuration « dispersée » ou « agrégée ». Alors que l'état « dispersé » permet le maximum de fluidité, l'état « agrégé » ou « coagulé » se traduit par une plus grande viscosité.
En faisant varier le pH et la force ionique (teneur en sel) du milieu on peut donc faire coaguler une boue d'argile.
Les résultats obtenus pour la terre de Brézins sont présentés ci-dessous. La diminution du pH, c'est à dire l'acidification du milieu, suffit à elle seule à engendrer une coagulation. L'ajout de sel de table (NaCl) n'a pas d'effet notable sur la viscosité. En revanche, à partir d'un état dispersé (pH basique), l'ajout de sel provoque la coagulation.

↓ La configuration (I) correspond à l'état dispersé. Dans les configuration (III), les argiles forment des agrégats très compacts : seule une faible quantité d'eau est piégée dans l'agrégat, le mélange est fluide. Seules les configurations (II) permettent d'obtenir une boue coagulée, correspondant à un arrangement bord-face des argiles dit « en château de cartes ».



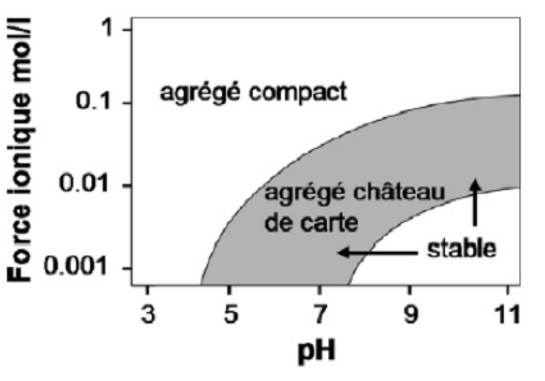





Afin de différer la coagulation dans le temps, plusieurs solutions ont été envisagées.
En introduisant le sel sous forme de gros grains dans un mortier dispersé, son effet coagulant est retardé par la dissolution progressive du sel. Des essais d'étalement ont été réalisés pour mesurer l'effet de l'ajout de gros sel sur la viscosité de mortiers de terre. Au bout d'une minute, l'étalement du mortier avait diminué de 25 %. Au bout de quinze minutes la diminution observée était de l'ordre de 50 %.
Par ailleurs, l'action bactérienne a été utilisée pour acidifier le milieu. Un apport initial de bactéries a été amené par ajout de yaourt dans les dispersions. Puis, pour assurer la prolifération de ces bactéries, du glucose a été régulièrement ajouté comme nutriment. L'évolution du pH et de la viscosité a été étudiée en fonction du temps, pour l'échantillon avec bactéries et glucose et un échantillon témoin. On a pu observer une acidification nette du milieu avec le temps : le pH est passé de 8,1 (pH naturel des fines argilo-calcaires) à 4,5 en 10 jours.

Le transfert de ces résultats à l'échelle du chantier demeure cependant complexe. Tout d'abord nous constatons des comportements rhéologiques très différents entre la terre de Brézins, la terre rouge de Royans et les fines argilo-calcaires : la coagulation ne se produit pas aux mêmes conditions physicochimiques.

Le comportement rhéologique en fonction du pH et du sel est propre à chaque matière première et ne peut pas, dans l'état actuel de nos connaissances, être généralisé.
De plus, les variations de viscosité observées sur des suspensions argileuses restent modestes. Un mortier de terre étant constitué à la fois d'argile et de grains, l'effet de la coagulation est encore moins spectaculaire sur une terre réelle. L'objectif de produits décoffrables sur quelques jours semble peu réaliste en utilisant cette méthode seule.




↑ Représentation schématique de la transition liquide-solide d'une suspension d'argile en fonction du pH et de la force ionique. La suspension peut être coagulée en décalant le pH de 10 à 5 ou en augmentant la force ionique à pH 10.

BETON D'ARGILE ENVIRONNEMENTAL

# Conclusion et perspectives



Le projet Béton d'Argile Environnemental avait pour objectif d'apporter des réponses à des attentes exprimées par certains acteurs de la filière terre crue pour la construction. Ces attentes ont été réexprimées à la fin du projet par les différents partenaires industriels :

- contribuer à une **structuration de la filière** terre crue en faisant **collaborer** différents acteurs (entreprises, laboratoires, centre technique, ...) ;
- **capitaliser les connaissances scientifiques** sur les propriétés de la terre crue, pour que ce matériau soit mieux accepté et pris en compte dans la conception des ouvrages ;
- **développer de nouveaux produits** pour enrichir l'offre de produits à base de terre crue sur le marché de la construction écologique ;
- **baisser les coûts de production** pour démocratiser la construction en terre.

Pour les laboratoires de recherche impliqués, les attentes principales sont :

- **produire des résultats scientifiques** permettant de mieux maîtriser le matériau terre ;
- **creuser des pistes d'innovation ;**
- **publier les résultats de recherches.**

Le montage du projet BAE a permis de répondre à ces attentes et de dynamiser les recherches des laboratoires impliqués sur le thème de la construction en terre. Des résultats significatifs ont été obtenus qui méritent d'être approfondis et ouvrent la voie à des innovations futures.



## Perspectives de RECHERCHE

Les recherches se poursuivent actuellement au sein des laboratoires partenaires notamment sur le thème de la coagulation des bétons d'argile. Le sujet des bétons d'argile ouvre des perspectives de recherche pour les laboratoires universitaires, notamment sur l'exploration des dispersants naturels.
Plus globalement, les connaissances nécessaires à la formulation de bétons d'argile s'enrichissent et permettent peu à peu de répondre à des demandes concrètes.

## Perspectives d' APPLICATIONS

Les Carrières du Boulonnais poursuivent le développement de produits à base de fines argilo-calcaires. Le béton de fines argilo-calcaires formulé dans le cadre du projet a fait ses preuves sur différents chantiers pilotes. À ce titre il a été validé par une ATEX de type B auprès du CSTB.

À l'issu du projet, des professionels (architectes, ingénieurs, maçons) impliqués en tant que partenaires, se sont réunis pour créer un bureau d'études spécialisé dans la construction en terre : BEterre. Il intervient notamment sur l'assistance technique de projets en terre coulée, soit en utilisant la formulation développée dans le cadre du projet, soit en l'adaptant aux matières premières disponibles sur le site.

## Perspectives de FORMATION

Les résultats obtenus dans le cadre du projet contribuent à enrichir les formations dispensées par les partenaires. Ils sont diffusés auprès d'étudiants de différentes écoles d'architecture et d'ingénierie. L'enseignement des bétons d'argile est ainsi intégré à des modules pédagogiques sur le thème des matériaux de construction innovants.

## Perspectives de DIFFUSION

Au-delà du réseau de professionnels spécialisés dans la terre crue, ce document a vocation à être diffusé largement auprès de l'ensemble des acteurs de la construction.
En parallèle, l'objectif est de structurer un réseau autour du thème de la terre coulée et des bétons d'argile pour permettre un meilleur partage des connaissances et l'élaboration des stratégies pour le développement de la filière.

BETON D'ARGILE ENVIRONNEMENTAL

# Bibliographie sélective





**Abend, S, Lagaly, G (2000).** *Sol-gel transition of sodium montmorillonite dispersions.* Applied Clay Science, vol. 284, n°9.

**Andrade, FA, Al-Qureshi, HA, Hotza, D (2011).** *Measuring the plasticity of clays: A review.* Applied Clay Science, Vol. 51, N° 1-2, pp. 1 - 7.

**Anger, R (2011).** *Approche granulaire et colloïdale du matériau terre pour la construction.* Thèse de doctorat EDML, Lyon: INSA de Lyon.

**Arnaud, L (2000).** *Mechanical and thermal properties of hemp mortars and wools: experimental and theoretical approaches*. In: Bioressource Hemp 2000 & other Fibre Crops, 13-16 september 2000, Wolfsburg.

**Aubert, JE (2013).** *Caractérisation des briques de terre crue de Midi-Pyrénées.* Rapport final du projet TERCRUSO. INSA, Toulouse, 24p.

**Cerezo, V (2005).** *Propriétés mécanique, thermique et acoustique d'un matériau à base de particules végétales: approche expérimentale et modélisation théorique.* Thèse MEGAENTPE. Lyon: INSA de Lyon.

**Doat, P, Houben, H, Matuk, S, Vitoux, F, Hayes, A (1979).** *Construire en terre*, Parenthèses.

**Evrard, A (2008).** *Transient hygrothermal behaviour of Lime-Hemp Material.* Thèse de doctorat Sciences de l'Ingénieur, Louvain: École Polytechnique de Louvain Unité d'Architecture

**Flatt, RJ, Martys, N, Bergström, L (2004).** *The rheology of cementitious materials*, MRS Bulletin, vol. XXIX, n°5.

**Fontaine, L, Anger, R (2009).** *Bâtir en terre - Du grain de sable à l'architecture.* Ed. Belin/Cité des Sciences et de l'Industrie.

**Gelard, D (2005).** *Identification et caractérisation de la cohésion interne du matériau terre dans ses conditions naturelles de conservation.* Thèse de doctorat Terre, Univers, Environnement, Grenoble: INPG.

**Heitz, P (2014).** *La pathologie humide du pisé.* AQC Qualité Construction, n°143, p. 62-69.

**Houben, H, Guillaud, H (1989).** *Traité de construction en terre* CRATerre, Editions Parenthèses, Marseille (3ème éd. 2006).

**Ip, K, Miller, A (2009).** *Thermal behaviour of an earth-sheltered autonomous building - The Brighton Earthship*. Renewable Energy, Vol. 34, N° 9, pp. 2037 - 2043.

**Kimura, K (1988).** *Passive cooling effect of a massive vernacular house examined by field measurements under summer conditions in Japan.* Proceedings of the 6th International PLEA Conference, Porto, pp. 765 - 779.

**Laurent, J-P (1986).** *Contribution à la caractérisation thermique des milieux poreux granulaires : optimisation d'outils de mesure « in-situ » des paramètres thermiques, application à l'étude des propriétés thermiques du matériau terre*. Thèse de doctorat, Grenoble: INPG, 226 p.

**Eckermann, W., Röhlen, U., Ziegert, C (2007).** *Auswirkungen von Lehmbaustoffen auf das Raumklima*. 0, Venzmer, H.: Europäischer Sanierungskalender 2008 Beuth Verlag.

**Martin, S., Mazarron, F.R., Cañas, I (2010).** *Study of thermal environment inside rural houses of Navapalos (Spain): The advantages of reuse buildings of high thermal inertia*. Construction and Building Materials, Vol. 24, pp. 666 - 676.

**Majzik A, Tombácz E. (2007).** *Interaction between humic acid and montmorillonite in the presence of calcium ions II. Colloidal interactions: Charge state, dispersing and/or aggregation of particles in suspension.* Organic Geochemistry, 38, 1330-1340.

**Moevus, M., Jorand, Y., Maximilien, S., Olagnon, C., Anger, R., Fontaine, L., Arnaud, L. (2015).** *Earthen construction: an increase of the mechanical strength by optimizing the dispersion of the binder phase.* Materials and structures.

**Nguyen, TT (2010).** *Contribution à l'étude de la formulation et du procédé de fabrication d'éléments de construction en béton de chanvre.* Thèse de doctorat SICMA, Université de Bretagne Sud, 268 p.

**Pellenq, R, Van Damme, H (2004).** *Why does concrete set? The nature of cohesion forces in hardened cement-based materials.* MRS Bulletin, Vol. XXIX, n°5.

**Plank J. and Bian H. (2010).** *Method to assess the quality of casein used as superplasticizer in self-levelling compounds,* Cement and Concrete Research, Volume 40, Issue 5, 710–715.

**Samri, D (2008).** *Analyse physique et caractérisation hygrothermique des matériaux de construction: approche expérimentale et modélisation numérique.* Thèse de doctorat, Lyon : INSA de Lyon.

**Tombacz E., Szekeres M. (2004).** *Colloidal behavior of aqueous montmorillonite suspensions: the specific role of pH in the presence of indifferent electrolytes*. Applied Clay Science, 27, 75-94

**Tombácz E, Szekeres M. (2006).** *Surface charge heterogeneity of kaolinite in aqueous suspension in comparison with montmorillonite*, Applied Clay Science, 34, 105-124.

**Van Damme, H (2001).** *L'eau et sa représentation*. In: *Mécanique des sols non saturés*, Hermès-Lavoisier.

**Van Olphen, H (1963).** *An introduction to clay colloid chemistry*. Inter science.

**Vissac, A, Fontaine, L, Anger, R (2012).** *Recettes traditionnelles & Classification des stabilisants d'origine animale ou végétale.* Rapport du projet PaTerre+ *Interactions argiles/biopolymères: Patrimoine architectural en Terre et stabilisants naturels d'origine animale et végétale*. Grenoble: CRAterre-AE&CC-ENSAG.




ISBN 978-2-906901-94-0
9 782906 901940